



Sistema de Detecção de Posição

Óscar Manuel Carvalho de Miranda

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Júri

Presidente: Prof. João Manuel Torres Caldinhas Simões Vaz.

Orientadores: Prof. António Carlos de Campos Simões Baptista.

Prof^a Maria João Marques Martins.

Vogais: Prof. Jorge Manuel Torres Pereira.

Prof. Pedro Nuno Mendonça dos Santos.

Outubro de 2013

Agradecimentos

Começo por agradecer aos meus pais, pela educação e suporte emocional, bem como à minha irmã, pelo companheirismo e pelos exemplos de sucesso conquistados com esforço e determinação.

Faço um agradecimento muito sincero a um conjunto de pessoas e instituições, que tornaram possível a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, o Senhor Professor Doutor António Baptista, por acreditar, encorajar e apoiar a realização deste trabalho.

À minha co-orientadora, a Senhora Professora Doutora Maria João Martins, por ter contribuído e apoiado, na investigação deste projecto.

Aos meus camaradas, colegas e amigos, agradeço pelos ótimos momentos de convivência, estudo, partilha de conhecimentos, e pelos momentos de descontração.

Resumo

O trabalho a desenvolver nesta Dissertação enquadra-se no âmbito do projecto FIREND[®], no qual se pretende projectar uma munição que permita a colaboração da artilharia no combate a incêndios florestais. Essa munição deve libertar uma substância, que possibilite o retardamento da expansão do fogo ou mesmo a sua extinção. A presente Dissertação descreve um sistema de altimetria que permite o accionamento da munição antes do seu embate com o solo.

O sistema de altimetria utiliza um laser e o método de medida de distâncias conhecido por telemetria por impulsos. Na telemetria por impulsos o sistema tem basicamente um emissor laser e um foto-receptor. A distância é calculada através da medida do tempo de voo de um impulso emitido pelo laser, ou seja, do tempo que decorre desde a emissão do impulso até à sua chegada ao foto-receptor após ser reflectido pelo alvo. A colocação do sistema de altimetria na munição impõe um conjunto de restrições ao sistema. Assim as suas dimensões devem ser reduzidas, não necessita de uma precisão de medida muito elevada (~1m), deve ter um custo baixo e deve ser capaz de suportar os valores da aceleração inicial aquando do lançamento da munição.

Palavras-chave: Incêndios florestais, artilharia, altimetria, laser, telemetria por impulsos.

Abstract

This research is part of the project FIREND®, which aims to design ammunition that allows the artillery collaborate in forest fires fighting. This ammunition should release a substance that allows delaying the expansion of fire or even the extinction. This master thesis describes an altimetry system that allows the actuation of the ammunition before the impact with the ground.

The altimetry system uses a laser measurement method known by pulsed telemetry. In the pulse telemetry system is basically a laser emitter and a photo-receiver. The distance is calculated by measuring the time of flight of a pulse emitted by the laser, ie, the time from the emission of the pulse until it reaches the photo-receiver after being reflected by the target. The ammunition imposes some conditions on the project of the altimetry system namely on the physical dimensions of the system, on the precision of the measures (~1m) and on the cost of the system. Additionally the system has to support the initial acceleration when the ammunition is fired.

Keywords: forest fires, artillery, altimetry, laser, pulsed telemetry.

Índice

Agradecimentos	I
Resumo	II
Abstract.....	III
Lista de Tabelas.....	VI
Lista de Figuras.....	VII
Lista de acrónimos e siglas	IX
1-Introdução	1
1.1-Contexto geral	1
1.2- Estado da arte	5
1.3- Estrutura da Dissertação	7
2. Envolvimento e estudo teórico	8
2.1 Considerações iniciais para o projecto.....	8
2.2. Trajectória de uma munição	9
2.2.1-Trajectória de uma munição sem consideração do atrito	9
2.2.2- Trajectória da munição considerando a resistência do ar.....	15
2.2.3. Curva de segurança	18
2.3. Estimativa de distâncias.....	19
2.3.1- Telemetria por comparação de fase.....	19
2.3.2- Telemetria por impulsos	20
2.3.3- Erros inerentes aos sistemas que utilizam a telemetria	22
2.4- Propriedades dos <i>lasers</i>	23
3.Simulação.....	24
3.1- Área iluminada pela radiação laser no solo.....	24
3.2- Conceito de reflexão	28
3.3-Simulação considerando a influência da atmosfera e do solo	32
3.3.1- Modelo para a trajectória vertical	32
3.3.2- Modelo para a trajectória oblíqua	35
4- Projecto do sistema de altimetria.....	38
4.1- Descrição do sistema de altimetria	38
4.1.1- Emissor	39
4.1.2- Receptor.....	47
4.2- Comando	53
5. Ensaio experimental	54

5.1-Equipamento utilizado.....	54
5.1.1-Emissor	54
5.1.2-Modulador	54
5.1.3-Montagem do sistema para emissão de impulsos	55
5.1.4- Foto-receptor.....	56
5.1.5- Gerador de impulsos	57
5.1.6- Fontes de tensão.....	58
5.1.7-Determinação da distância.....	58
5.2- Determinação da modulação máxima suportada pelo laser	59
5.3-Resultados obtidos.....	60
5.3.1- Resultados obtidos para a primeira montagem	61
6. Conclusões, Perspectivas de trabalho futuro e contribuições originais.....	64
6.1 Conclusões finais	64
6.2- Trabalhos futuros	65
Bibliografia	67
Anexos.....	70
Anexo A- Classificação dos <i>lasers</i>	70
Anexo B- Colimação de um feixe laser	71
Anexo C- Material constituinte dos foto-díodos	72
Anexo D-Modulador ic-HK	73

Lista de Tabelas

Tabela 1. 1: Distribuição anual do número de ocorrências e área ardida entre 2002 e 2012.....	1
Tabela 2. 1: Tempo de ida e volta de um impulso.....	22
Tabela 2. 2: Valores a utilizar como período de relógio.....	22
Tabela 3. 1: Valores obtidos para os semieixos da elipse	28
Tabela 3. 2: Valor de referência para alguns tipos de terreno	31
Tabela 3. 3: Atenuação para 80% do tempo de voo	37
Tabela 3. 4: Atenuação a 20m de altura	37
Tabela 4. 1: Valores para: tempo e velocidade da munição a 20m do solo	38
Tabela 4. 2: Bandas de absorção da atmosfera terrestre [24].....	41
Tabela 4. 3: Comportamento da radiação electromagnética na atmosfera	42
Tabela 4. 4: Atenuação da atmosfera em função da distância de visibilidade	43
Tabela 4. 5: Intensidade de radiação e intensidade espectral do laser.....	46
Tabela 4. 6: Intensidade espectral para o fogo, no comprimento de onda de 905nm	46
Tabela 4. 7: Intensidade espectral para o Sol, no comprimento de onda de 905nm	47
Tabela 4. 8: Potência recebida do emissor SPL L90.....	49
Tabela 4. 9: Potência recebida do emissor SPL L90_3	49
Tabela 5. 1: Tempo teórico com o foto-receptor colocado em frente ao feixe	61
Tabela 5. 2: Tempos determinados com o foto-receptor colocado na direcção do feixe.....	62
Tabela 5. 3: Tempo teórico para um sistema de telemetria com reflexão espelhar	62
Tabela 5. 4: Tempo determinado com o sistema de teste	63
Tabela 6. 1: Força gravítica sofrida pela munição	65

Lista de Figuras

Figura 1. 1: Triângulo do fogo.	2
Figura 1. 2: Evolução histórica do conceito	3
Figura 1. 3: Princípio de funcionamento do sistema de altimetria.	4
Figura 1. 4: Exemplo da área coberta pela munição	5
Figura 1. 5: Exemplo de funcionamento do LIDAR.	6
Figura 2. 1: Trajectória típica do lançamento de um projectil.....	9
Figura 2. 2: Referencial para o lançamento vertical da munição	10
Figura 2. 3: Sistema de forças numa munição em queda vertical.....	11
Figura 2. 4: Queda da munição na vertical e variação da sua velocidade em $m.s^{-1}$	12
Figura 2. 5: Componentes horizontais e verticais da velocidade.....	12
Figura 2. 6: Decomposição dos vectores da velocidade.	13
Figura 2. 7: Lançamento de projectil para os ângulos de:.....	14
Figura 2. 8: Munição 155mm	15
Figura 2. 9: Munição FIREND 105mm	16
Figura 2. 10: Trajectória para uma queda na vertical com atrito.....	16
Figura 2. 11: Lançamento para os vários ângulos, considerando	17
Figura 2. 12: Lançamento do projectil considerando o atrito do ar para uma munição do tipo esférica	18
Figura 2. 13: Curva de segurança	19
Figura 2. 14: Curva de segurança para os ângulos de 45° e 60°	19
Figura 2. 15: Sistema que utiliza telemetria (1), Objecto a detectar (2).....	20
Figura 2. 16: Diagrama de blocos de um sistema de telemetria por impulso	21
Figura 2. 17: Esquema de um díodo laser (LD) com foto-díodo (PD) incorporado	21
Figura 3. 1: Início de emissão de impulsos e início de ejeção do químico.....	24
Figura 3. 2: Obtenção do círculo e de uma elipse através de um cone	25
Figura 3. 3: Área iluminada por uma munição a descrever uma trajectória oblíqua.....	25
Figura 3. 4: Trajectória para uma munição sem considerar o atrito	26
Figura 3. 5: Trajectória de uma munição, considerando o atrito	26
Figura 3. 6: Parâmetros considerados para determinação da área iluminada	27
Figura 3. 7: Lei dos senos	27
Figura 3. 8: Reflexão difusa.....	29
Figura 3. 9: Reflexão de impulso em alvo cooperativo.....	29
Figura 3. 10: Difusor quase perfeito.....	29
Figura 3. 11: Difusor perfeito (Lambert).....	30
Figura 3. 12: Polarização horizontal.....	31
Figura 3. 13: Demonstração da distância ao solo e o raio do círculo	32
Figura 3. 14: Atenuação sofrida pelo feixe	34
Figura 3. 15: Queda da munição, na vertical	34
Figura 3. 16: Atenuação do feixe, considerando os factores condicionantes	34

Figura 3. 17: Potência recebida no foto-receptor	35
Figura 3. 18: Atenuação sofrida pelo feixe, para um ângulo de lançamento de 30°	36
Figura 3. 19: Atenuação sofrida pelo feixe, para um ângulo de lançamento de 45°	36
Figura 3. 20: Atenuação sofrida pelo feixe, para um ângulo de lançamento de 60°	36
Figura 4. 1: Projecto de um sistema que utiliza a telemetria	38
Figura 4. 2: Diagrama de blocos do emissor.....	39
Figura 4. 3: Laser SPL LL da OSRAM	40
Figura 4. 4: Integrado SPL L90 da OSRAM.....	40
Figura 4. 5: Transmissão dos comprimentos de onda [25]	41
Figura 4. 6: Abertura numérica.....	44
Figura 4. 7: Preenchimento do meio entre o díodo laser e lente colimadora.....	44
Figura 4. 8: Plano paralelo e perpendicular de um díodo laser.....	45
Figura 4. 9: Diagrama de blocos do receptor	47
Figura 4. 10: Cálculo da abertura numérica	48
Figura 4. 11:Incêndio florestal	48
Figura 4. 12: Resposta do foto-díodo SARF500.....	50
Figura 4. 13: Amplificador OPA_380	50
Figura 4. 14: Activação do contador	51
Figura 4. 15: Contador do tempo de voo.....	52
Figura 4. 16: TDC da ACAM	52
Figura 4. 17: Microcontrolador TMS320C2834.....	53
Figura 5. 1: Ponteiro laser e óptica	54
Figura 5. 2: Modulador de impulsos ic-HK	55
Figura 5. 3: Valor da corrente em função da resistência e da tensão de entrada	55
Figura 5. 4: Sistema de emissão.....	56
Figura 5. 5: Sistema de recepção	56
Figura 5. 6: Foto-receptor Newport 818-BB-21A	56
Figura 5. 7: Resposta do foto-receptor em função do comprimento de onda a detectar	57
Figura 5. 8: Representação de um impulso com duração de 18µs.....	58
Figura 5. 9: Frequencímetro UC10A, Beckman.....	59
Figura 5. 10: Foto-receptor colocado na direcção do feixe emitido pelo laser	59
Figura 5. 11: Impulso vindo do gerador (1), impulso recebido no foto-receptor (2)	60
Figura 5. 12: Impulso emitido pelo laser verde	60
Figura 5. 13: Emissor e receptor.....	61
Figura 5. 14: Objecto a detectar, colocado a 0.50m do sistema de medição	62
Figura 6. 1: Utilização de 3 foto-receptores para superar o efeito de rotação	66
Figura 6. 2: Uso de um laser como sistema de audição de longo alcance	66
Figura 6. 3: Robot JAGUAR 4x4- Wheel	66

Lista de acrónimos e siglas

ANPC.....	Autoridade Nacional de Protecção Civil.
ICNF.....	Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas.
IST.....	Instituto Superior Técnico.
GNR.....	Guarda Nacional Republicana.
UAV.....	Unmanned Aerial Vehicle.
FUPEF.....	Fundação de Pesquisas Florestais.
NASA.....	National Aeronautics and Space Administration.
LIDAR.....	Light Detection and Ranging.
LASER.....	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.
MASER.....	Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

Capítulo 1

1-Introdução

1.1-Contexto geral

Portugal é um dos países do sul da Europa mais afectado, em termos relativos, pela ocorrência de incêndios florestais, contabilizando um elevado número de ocorrências e grandes áreas ardidas face à sua área territorial. Os incêndios florestais são uma preocupação, não só pelas questões relativas à segurança das populações, mas também pelos prejuízos causados à economia e recursos naturais do nosso país.

A tabela 1, retirada do **Relatório Anual de Áreas Ardidas e Incêndios Florestais em Portugal Continental** [1], apresenta a evolução da área de floresta ardida em território nacional desde 2002 a 2012, em virtude dos incêndios florestais. No ano de 2012 contabilizaram-se, em Portugal Continental, 21.176 ocorrências, que terão consumido cerca de 110.232 hectares, dos quais 44% em povoamentos florestais e 56% em matos.

Tabela 1. 1: Distribuição anual do número de ocorrências e área ardida entre 2002 e 2012.

Anos	Ocorrências			Área ardida (hectares)		
	Incêndios Florestais	Fogachos (Área <1ha)	Total	Povoamentos	Matos	Total
2002	6.521	20.055	26.576	65.164	59.455	124.619
2003	5.323	20.896	26.219	286.055	139.784	425.839
2004	5.069	17.096	22.165	56.271	73.836	130.107
2005	8.192	27.631	35.823	213.921	125.168	339.089
2006	3.499	16.945	20.444	36.320	39.738	76.058
2007	3.677	16.639	20.316	9.829	22.766	32.595
2008	2.591	12.339	14.930	5.461	12.103	17.564
2009	5.862	20.274	26.136	24.097	63.323	87.420
2010	3.970	18.057	22.027	46.079	87.011	133.090
2011	5.043	20.179	25.222	20.044	53.785	73.829
2012	4.425	16.751	21.176	48.067	62.165	110.232
Média 2002-2011	4.975	19.011	23.986	76.324	67.697	144.021

O Exército, para responder às solicitações governamentais, tem desde 2004, um plano designado por Plano Vulcano [2], que contempla a sua intervenção em diferentes fases do combate aos incêndios florestais, prevenção, vigilância e combate em primeira intervenção.

Em 2005 é criado o **Grupo de Intervenção de Protecção e Socorro (GIPS)** [3], da Unidade de Intervenção da Guarda Nacional Republicana, que tem por missão específica a execução de acções de prevenção e de intervenção de primeira linha em todo o território nacional, em situações de emergência de

protecção e socorro, designadamente nas ocorrências de incêndios florestais ou de matérias perigosas, catástrofes ou acidentes graves.

Dados da Comissão Europeia, de 2006, dizem que **Portugal é o país do Sul da Europa que mais incêndios florestais teve nos últimos 25 anos**, e é um dos que tem uma maior área do seu território destruída por este flagelo [4]. Em 2011, o número de hectares ardidos foram 73.829, o que, segundo o jornal expresso [5], ascende a um prejuízo de mil milhões de euros, em que €150 milhões correspondem a prejuízos directos nas matas e florestas ardidas e €850 milhões a produtos que deixam de ser fabricados em Portugal devido à falta de madeira.

Segundo SOARES [6], os conceitos gerais sobre combustão e propagação dos fogos são os seguintes: Fogo, de um modo geral, é o termo aplicado ao fenómeno físico resultante da rápida combinação entre o oxigénio e uma substância qualquer (ex. madeira), com a produção de calor, luz e, geralmente chama. Fogo ou mais precisamente combustão é portanto uma reacção química de oxidação. Analisando a reacção da combustão completa da madeira, que poderia ser generalizada para todo o material combustível florestal, percebe-se que ela envolve três elementos básicos: combustível, oxigénio e calor. Em qualquer incêndio florestal é necessário haver combustível para queimar, oxigénio para manter as chamas e calor para iniciar e continuar o processo de queima. Essa inter-relação entre os três elementos básicos da combustão é conhecida como “Triângulo do Fogo”. A ausência, ou redução abaixo de certos níveis, de qualquer um dos componentes do triângulo do fogo inviabiliza o processo de combustão.



Figura 1. 1: Triângulo do fogo.

Para extinguir a combustão, é necessário a eliminação (ou minimização) de, pelo menos, um dos elementos anteriormente referidos. Contudo, na extinção de um incêndio, muitas vezes tenta eliminar-se mais do que um destes elementos com o objectivo de se extinguir a combustão o mais rapidamente possível.

Os incêndios florestais são combatidos por via terrestre ou por via aérea. A possibilidade de a artilharia poder ajudar no combate aos incêndios foi levantada há alguns anos. A explosão da munição lançada por um obus é determinada pela sua espoleta. Em todo o armamento bélico a espoleta utiliza um explosivo para iniciar a detonação da munição, no entanto, a utilização de uma munição no combate a incêndios impõe o uso de espoletas sem explosivos. Surgiu assim, em 2005, a ideia de uma munição de artilharia de

detonação mecânica com uma geometria semelhante às munições de artilharia utilizadas actualmente, mas com um conceito de detonação mecânica, ou seja, não usa carga explosiva para a libertação da substância contida na munição, tendo-lhe sido atribuída a designação de FIREND®.

A introdução da munição que está a ser desenvolvida no âmbito do projecto FIREND® [7] vem colmatar algumas limitações actuais do combate a incêndios, quer por via terrestre quer por via aérea. Este sistema pode operar em condições de visibilidade reduzida, por exemplo durante a noite, quando os meios aéreos têm de se retirar por falta de visibilidade, e tem a capacidade de combater incêndios em qualquer tipo de terreno, devido às capacidades de lançamento do obus.

A munição FIREND® é lançada de aproximadamente 3km da frente do incêndio pelo obus, reduzindo assim, o contacto das pessoas com a frente do fogo, o que significa que com este projecto, não só é possível atingir locais de difícil acesso, mas também contribuir para uma diminuição dos riscos por parte das pessoas que combatem o fogo de forma directa.

Foram executadas desde o ano lectivo de 2004/2005, um total de quatro Dissertações de Mestrado [7] [8] [9] [10], acerca do projecto FIREND®. Todas as Dissertações efectuadas até ao momento consistiam no estudo da melhor geometria para a munição de 105mm e o melhor sistema de ejeção mecânica após o impacto no solo.

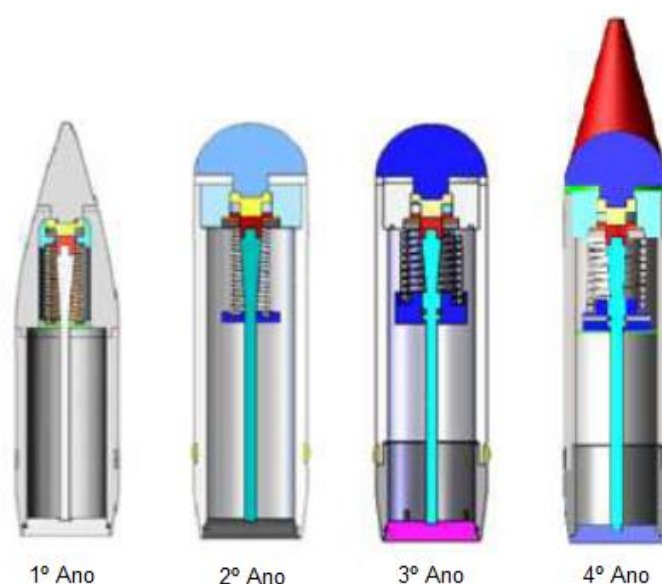


Figura 1. 2: Evolução histórica do conceito

No presente ano (quinto ano do projecto), são efectuadas duas Dissertações. Uma executada por um aluno do curso de mestrado em engenharia mecânica [11], na qual se pretende efectuar o estudo para a utilização de munições com um calibre de 155mm em vez do actualmente utilizado de 105mm. A segunda (presente Dissertação) tem como objectivo o projecto de um sistema de altimetria, para colocação na munição, de modo a permitir o accionamento da mesma antes do seu embate no solo.

O sistema de altimetria detecta a distância ao solo através do envio e recepção de um sinal, e determina a altura a partir do intervalo de tempo entre a emissão de um impulso de radiação laser e a sua recepção na munção, como demonstrado na figura 1.3.

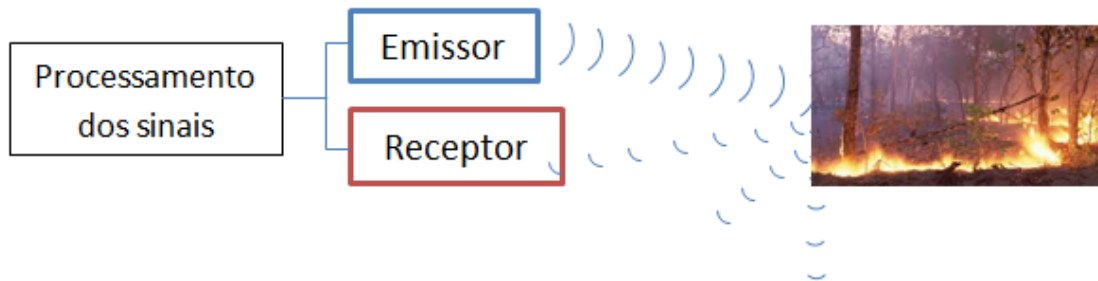


Figura 1. 3: Princípio de funcionamento do sistema de altimetria.

1.2- Estado da arte

O projecto FIREND[®], já estudado em várias Dissertações de Mestrado pelos alunos da Academia Militar, tem como objectivo utilizar uma munição lançada por um obus de artilharia no combate aos incêndios florestais. Com este fim, tem vindo a ser desenvolvido o projecto de uma munição que possa libertar uma substância química, cuja função é retardar a expansão ou extinguir o fogo.

Nas fases anteriores do projecto e após a execução de alguns testes reais com a munição de 105mm, foi determinado que o lançamento da substância química deve ser executado ainda durante o voo da munição.

O objectivo do presente trabalho consiste no dimensionamento de um sistema de altimetria, usando um laser, com a finalidade de accionar a espoleta e provocar a libertação da substância química utilizada no combate aos incêndios, entre os 7 e 20 m da altura, como referido anteriormente. Deste modo e admitindo que a substância se espalha de um forma uniforme sobre o terreno, capaz de cobrir uma área do tipo circular, com um raio de 10m, possibilita que com o lançamento de 6 munições cobrir uma linha de 120m de distância, como ilustrado na figura 1.4.

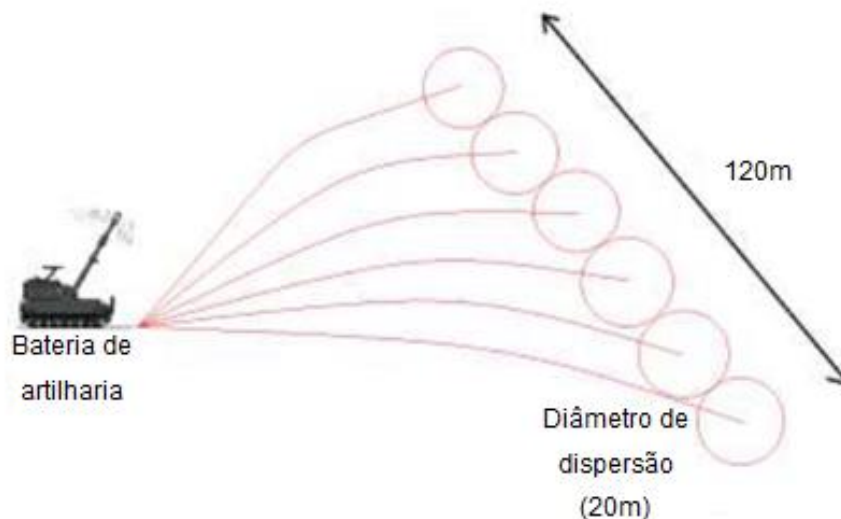


Figura 1. 4: Exemplo da área coberta pela munição

Existem diversos métodos para a estimativa de distâncias. Alguns destes, tais como o método de triangulação, são utilizados já há muitos séculos, por navegadores e cartógrafos. Outros métodos surgiram pela tentativa de aproveitar as características notáveis da luz, aos quais foi atribuído o nome de telemetria.

A palavra telemetria é de origem grega, onde *tele* significa remoto e *metron* significa medida. A telemetria é portanto uma técnica de medida remota de uma distância.

A escolha do método de funcionamento do medidor depende da finalidade a que este se destina. Alguns tipos, como o medidor por triangulação, são simples e eficientes para distâncias pequenas, de 2mm até 500mm. Já o medidor de distância utilizando o princípio da telemetria por impulsos é muito utilizado em

topografia e usos militares, onde as distâncias são grandes, sendo capazes de atingir precisão melhor que 1cm em 20m.

Uma aplicação já existente, a qual inclui um sistema semelhante àquele que se pretende desenvolver na presente Dissertação é o LIDAR (Light Detection and Ranging) [12]. O LIDAR quando colocado num avião ou satélite permite, por exemplo, a determinação do relevo do terreno, para o qual está direccionado. Na figura seguinte é apresentado um esquema sumário do funcionamento do LIDAR.

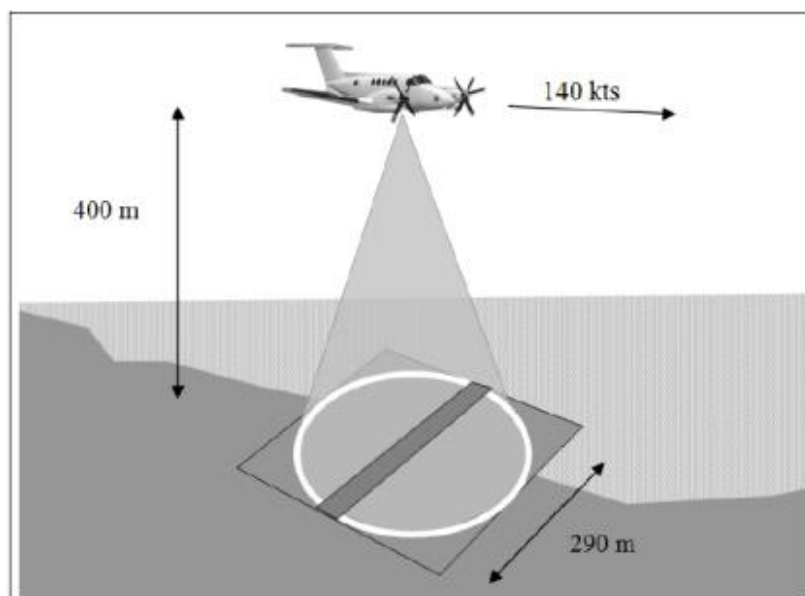


Figura 1. 5: Exemplo de funcionamento do LIDAR.

O projecto do sistema de altimetria, que se pretende desenhar, tem condicionantes próprias, tais como:

- os valores da aceleração inicial a que está sujeito aquando do lançamento da munição;
- as suas dimensões, limitadas pelo espaço disponível na munição;
- utilização única, pois pode ser destruído ou ficar perdido após o embate no solo, pelo que, deve ser um sistema com um custo reduzido;
- precisão reduzida, ordem dos metros, a nível de medição da distância;

Neste trabalho é desenvolvido o projecto do sistema de altimetria, não sendo ainda realizada a ligação deste sistema com o accionamento da espoleta. Por outro lado, embora haja a expectativa de que possa suportar as acelerações de lançamento já referidas, não é possível garantir nesta altura essa condicionante.

1.3- Estrutura da Dissertação

Este trabalho apresenta as seguintes etapas de desenvolvimento:

- Capítulo 1 – Introdução – introdução à temática do projecto, apresentação dos objectivos para a actual fase de desenvolvimento e descrição da evolução histórica do conceito desenvolvido neste trabalho;
- Capítulo 2 – Envolvimento e estudo teórico – estudo teórico e simulação para as trajectórias vertical e oblíqua.
- Capítulo 3 – Simulação – caracterização do processo de simulação e apresentação do conjunto de ferramentas desenvolvidas para auxiliar a simulação do sistema de altimetria a utilizar, para aplicação no projecto FIREND®;
- Capítulo 4 – Projecto do sistema de altimetria – apresentação de um projecto possível de utilizar na munição do projecto FIREND®;
- Capítulo 5 – Ensaio experimental – apresentam-se alguns ensaios com material de laboratório e sistemas construídos com o intuito de ganhar alguma sensibilidade ao funcionamento do equipamento e características dos componentes ópticos, *lasers* e foto-receptores;
- Capítulo 6 – Conclusões e possíveis estudos futuros – análise, apresentação e discussão de resultados do projecto, assim como apresentação de propostas relativas a trabalhos futuros de continuidade deste projecto.

Capítulo 2

2. Envolvimento e estudo teórico

Como referido no primeiro capítulo deste projecto, pretende-se executar o estudo e simulação de um sistema de teste, usando um sistema óptico para a medição de distâncias.

O sistema de altimetria, estudado neste projecto, tem como objectivo a sua colocação na munição FIREND® 155mm e tem como função determinar o instante adequado para o accionamento da espoleta da munição, ou de outro modo, escolher o momento em que se deve libertar a substância química transportada pela munição para o combate aos incêndios.

O sistema em estudo tem como finalidade, a sua colocação na munição. Como a munição se desloca desde a boca do obus até ao ponto de accionamento, o funcionamento do sistema de altimetria vai depender da trajectória descrita. Neste capítulo apresentam-se as simulações realizadas com o objectivo de descrever a trajectória da munição, considerando quer o movimento sem atrito quer com o atrito resultante da resistência do ar. A partir destas trajectórias obtêm-se também as chamadas curvas de segurança uma vez que quando há fogos reais, por parte da artilharia, nenhuma aeronave pode voar no espaço aéreo em que transitam as munições. Ainda neste capítulo, são estudadas as várias possibilidades para a determinação de distâncias recorrendo a sistemas ópticos.

Todos os programas desenvolvidos, para uma melhor aproximação e visualização do projecto, foram realizados recorrendo à ferramenta informática MATLAB.

2.1 Considerações iniciais para o projecto

Para efectuar todo o estudo, simulação e construção de um sistema de altimetria deste género, foram colocadas algumas considerações iniciais por parte dos responsáveis pela condução do projecto FIREND®.

A primeira imposição consiste em efectuar todos os cálculos para os valores de referência da carga mais baixa utilizada pela artilharia, isto é, a carga 1. Esta é a primeira imposição que se coloca pelo facto de estar a ser desenvolvida em simultâneo uma outra Dissertação de mestrado, a qual consiste no dimensionamento de uma munição 155mm para o projecto FIREND®, que opera com o sistema de altimetria.

A carga 1 proporciona à saída do obus uma velocidade máxima de 207.3 m.s^{-1} , conforme referido nas tabelas de tiro padrão, usadas em artilharia. Quanto à sua velocidade final, esta é determinada pelos vários ângulos de lançamento que o obus define com o solo.

Para o presente estudo, apenas se utilizam os ângulos determinados pela Dissertação de dimensionamento da munição 155mm. Os ângulos de referência para este estudo são: 30° , o qual correspondendo ao menor ângulo possível para um obus executar o tiro, sem que haja estilhaços de retorno na direcção da qual se está a fazer fogo. O ângulo de 45° , é o ângulo em que, teoricamente o

alcance será máximo, e por fim, é utilizado o ângulo de 60° , que corresponde à altura máxima atingida pela munição, sem que esta ao embater no solo projecte estilhaços na direcção do obus que efectuou o disparo.

Um outro requisito que se impõe para o estudo deste projecto é que o sistema utilizado para a determinação da distância, seja capaz de ter um processamento suficientemente rápido, de tal forma que, após alcançada a altura ideal ao solo, este provoque a ordem de ejeção da substância química o mais rapidamente possível, pois é necessário ter em consideração a velocidade de queda da munição.

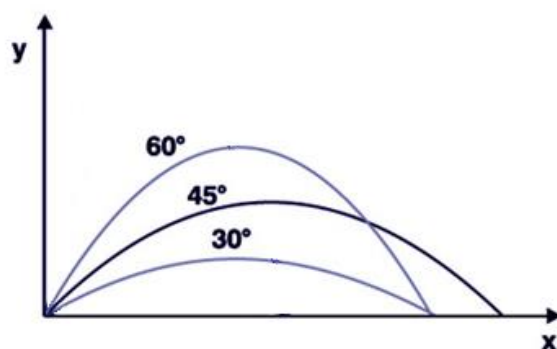


Figura 2. 1: Trajectória típica do lançamento de um projectil

2.2. Trajectória de uma munição

A balística é a ciência que estuda o movimento dos projecteis, disparados por armas de fogo, e os factores que os afectam. A carga propulsora e o movimento do projectil no interior da alma do tubo canhão de um determinado obus, condicionam a velocidade com que a munição abandona o obus. Esta velocidade expressa-se em metros por segundo e designa-se por velocidade inicial. Existem outras condicionantes para a trajectória da munição, por exemplo o movimento de translação (componente longitudinal devido aos gases de ejeção) e o movimento de rotação (devido às estrias do obus), que não são consideradas na simulação do movimento do projectil, efectuada no presente trabalho.

2.2.1-Trajectória de uma munição sem consideração do atrito

Para iniciar todo o estudo das possíveis trajectórias descritas pela munição, inicialmente será considerado o caso mais favorável para qualquer estudo com lançamentos de projecteis, ou seja, desprezando a resistência do ar.

2.2.1.1-Trajectória vertical

Para o lançamento de uma munição através de um obus, não é comum a execução do tiro a 90° , mas visto este projecto ser uma inovação para o combate a incêndios, pode ter várias formas de lançamento sobre o incêndio. Um objectivo futuro para esta munição, consiste em ser largada por um UAV ou por um helicóptero sobre o incêndio. Assumindo que o meio aéreo responsável pelo lançamento da munição está completamente estável sobre o incêndio, ou que a sua velocidade de deslocamento é muito baixa, a queda

da munição descrever uma trajectória do tipo vertical, pelo que, achou-se de relevante importância estudar este tipo de trajectória.

A figura 2.2 representa o sistema de eixos considerados para este estudo, assim como a altura em que a munição é largada da aeronave (y_0) e o momento em que o sistema deve originar a ejeção do químico (y).

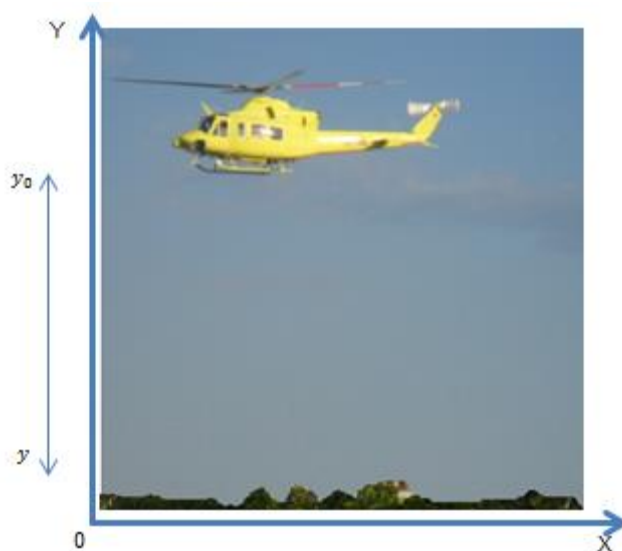


Figura 2. 2: Referencial para o lançamento vertical da munição

Como referido anteriormente, as condições consideradas, serão as mais favoráveis. Para este tipo de trajectória, apenas existe a influência da aceleração da gravidade, a qual é uma constante de valor aproximado $9,78 \text{ m.s}^{-2}$, [13], ficando apenas duas variáveis a existir neste tipo de lançamento, a velocidade final e a altura a que a munição é largada.

Para este caso específico, apenas existe a componente vertical da velocidade (v_y). Na fase em que a munição é largada da aeronave, a velocidade inicial para essa componente (v_{0y}) é nula, ou seja, $v_{0y} = 0$, pois não está a ser considerada nenhuma velocidade inicial na munição.

A componente da velocidade na vertical (v_y), é alterada consoante o tempo (t) que a munição demora a chegar à altura tomada como ideal, tempo esse que por sua vez, é dependente da altura a que a munição é largada (y_0).

O movimento horizontal não será tomado em consideração, pois a munição apenas descreve movimento vertical.

O valor da componente vertical da munição é descrito pela seguinte expressão:

$$y = y_0 + v_{0y}t + \frac{1}{2}a_y t^2 \quad (2.1)$$

na qual a_y corresponde ao efeito da aceleração da gravidade sobre a munição, t corresponde ao tempo que decorre desde que a munição é largada em y_0 até esta atingir a altura indicada para a libertação da substância química y .

Segundo a figura 2.3, é possível verificar o sistema de forças aplicado sobre a munição, quando o atrito do ar não é considerado.



Figura 2. 3: Sistema de forças numa munição em queda vertical

Neste caso, a força resultante do sistema, é igual ao peso (P), pelo que pode ser descrito por:

$$F = ma_y = -mg \quad (2.2)$$

onde m é a massa da munição, a_y a aceleração da componente vertical.

Da expressão 2.2 pode-se concluir que a aceleração existente neste tipo de movimento é exactamente a força da gravidade, ou seja, $a_y = -g$.

O tempo decorrido desde que a munição é largada até que esta atinge a altura ideal, pode ser determinado através da seguinte expressão:

$$t = \sqrt{\frac{y - y_0}{\frac{1}{2}g}} \quad (2.3)$$

Após a obtenção do tempo de voo da munição, é possível determinar a velocidade da munição ao longo da sua trajectória, nomeadamente, no ponto de altura considerado como ideal (20m):

$$v_y = gt \quad (2.4)$$

A figura 2.4 representa uma munição a cair apenas com a aceleração da gravidade, desde uma altura de 550m e com a altura ideal para a libertação da substância química a 20m do solo. A figura mais à direita representa a variação da velocidade, desde que a munição é largada, até esta atingir a altura ideal do solo:

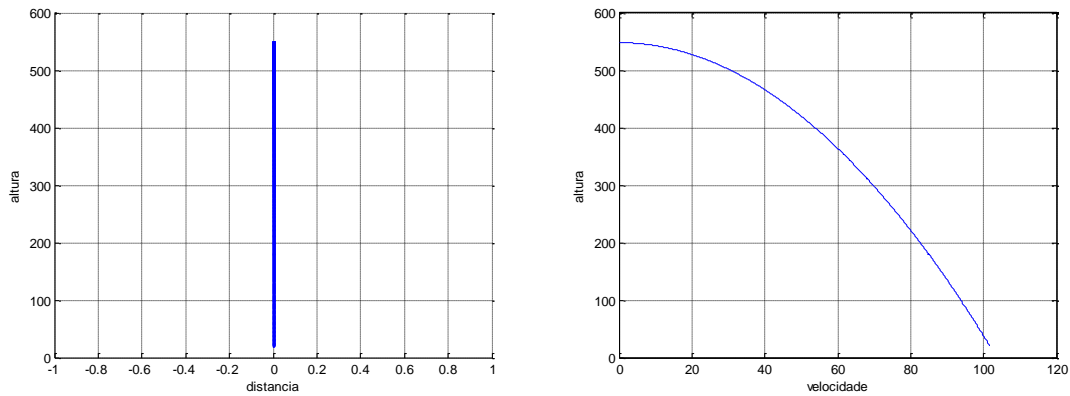


Figura 2. 4: Queda da munição na vertical e variação da sua velocidade em m.s^{-1}

2.2.1.2- Trajectória oblíqua

Nesta parte do subcapítulo é estudada a trajectória efectuada por uma munição, considerando o ângulo que o cano do obus faz com o solo, sem ser tomada em consideração a força de atrito.

Começando por analisar a componente da velocidade de lançamento (v_0), esta forma com a horizontal um ângulo distinto que pode variar entre 0° e 90° , o qual é designada por θ , como é possível verificar na figura 2.5.

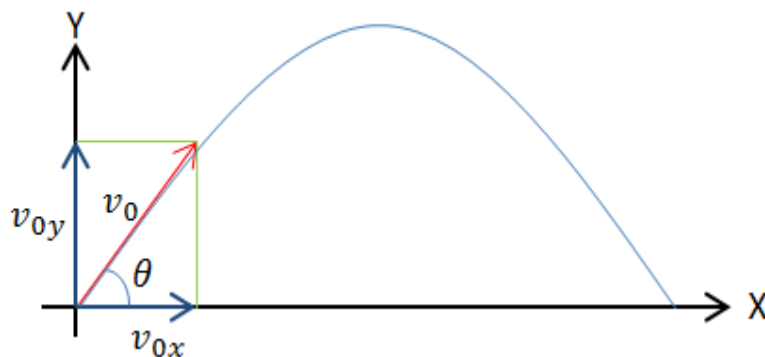


Figura 2. 5: Componentes horizontais e verticais da velocidade

A velocidade v_0 pode ser decomposta em duas componentes: v_{0x} , que corresponde à componente horizontal da velocidade, e por v_{0y} , que corresponde à componente vertical. A forma de obtenção destas componentes é descrita nas seguintes expressões:

$$v_{0x} = v_0 \cos \theta \quad (2.5)$$

$$v_{0y} = v_0 \sin \theta \quad (2.6)$$

nas quais, v_0 é o modulo da velocidade de lançamento da munição, quando esta sai à boca do cano do obus, o que corresponde a $v_0=207.3 \text{ m.s}^{-1}$.

O movimento da munição pode ser analisado como resultante da composição de dois movimentos independentes:

- a) Movimento horizontal - é um movimento uniforme, uma vez que v_{0x} é constante (desprezando-se a resistência do ar).
- b) Movimento vertical - a velocidade é variável, pois o corpo está sujeito à aceleração da gravidade. Assim sendo, na subida, o movimento é retardado (velocidade e aceleração têm sentidos contrários); na descida, o movimento é acelerado (velocidade e aceleração têm sentidos iguais).

Ao longo de toda a trajectória descrita pela munição, como referido anteriormente, a componente horizontal mantém-se constante, enquanto a vertical vai sofrendo alterações, figura 2.6. O módulo da velocidade, v , é dado por:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (2.7)$$

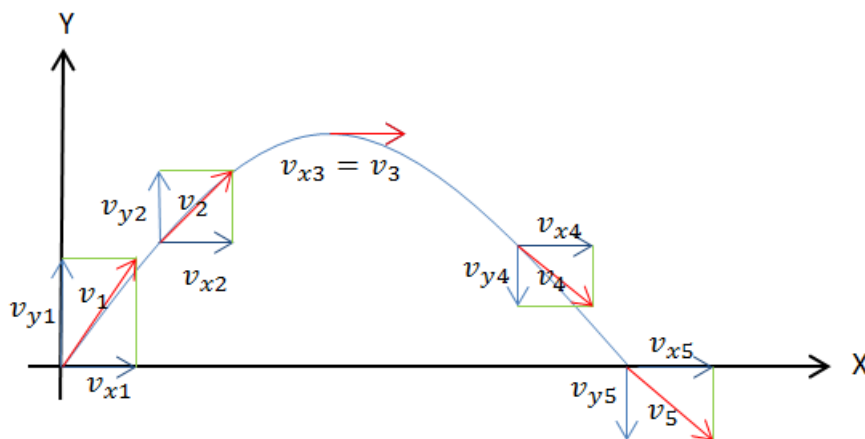


Figura 2. 6: Decomposição dos vectores da velocidade.

Como não está a ser tomada em consideração a força de atrito provocada pelo ar, projecteis com diferentes massas, mas lançados com a mesma velocidade inicial e o mesmo ângulo, têm alcances iguais.

Relativamente à força que actua na munição, a componente horizontal é nula, pois não sofre alteração da aceleração segundo a horizontal ($a_x = 0$) e a vertical, quando não se considera o atrito do ar, mantém-se constante ao longo da trajectória e pode ser descrita pela expressão 2.2, já referida anteriormente.

Quando se considera o ponto mais alto da trajectória, pode-se assumir que, a componente vertical da velocidade da munição se anula, e a velocidade fica reduzida à componente horizontal, pelo que, $v_y = 0$.

Assim, para calcular o tempo de subida, t_s , tempo que a munição demora a atingir a altura máxima, usa-se a equação que descreve o movimento vertical:

$$v_y = v_0 \sin \theta - gt \quad (2.8)$$

Como no ponto mais alto da trajetória, $v_y = 0 \text{ ms}^{-1}$, o tempo de subida t_s é dado por:

$$t_s = \frac{v_0 \sin \theta}{g} \quad (2.9)$$

As expressões utilizadas para o cálculo, quer do alcance (x), quer da altura máxima (y_m), vêm descritas em função do tempo de voo, $t_v = 2t_s$, e do ângulo de lançamento θ :

$$x_m = v_0 \cos \theta t_v \quad (2.10)$$

$$y_m = y_0 + v_0 \sin \theta t_s - \frac{1}{2} g t_s^2 \quad (2.11)$$

O programa desenvolvido, utilizando as expressões anteriormente enunciadas, permitiu calcular os alcances máximos, para quando a munição está a 20m do solo, bem como as alturas máximas atingidas por uma munição.

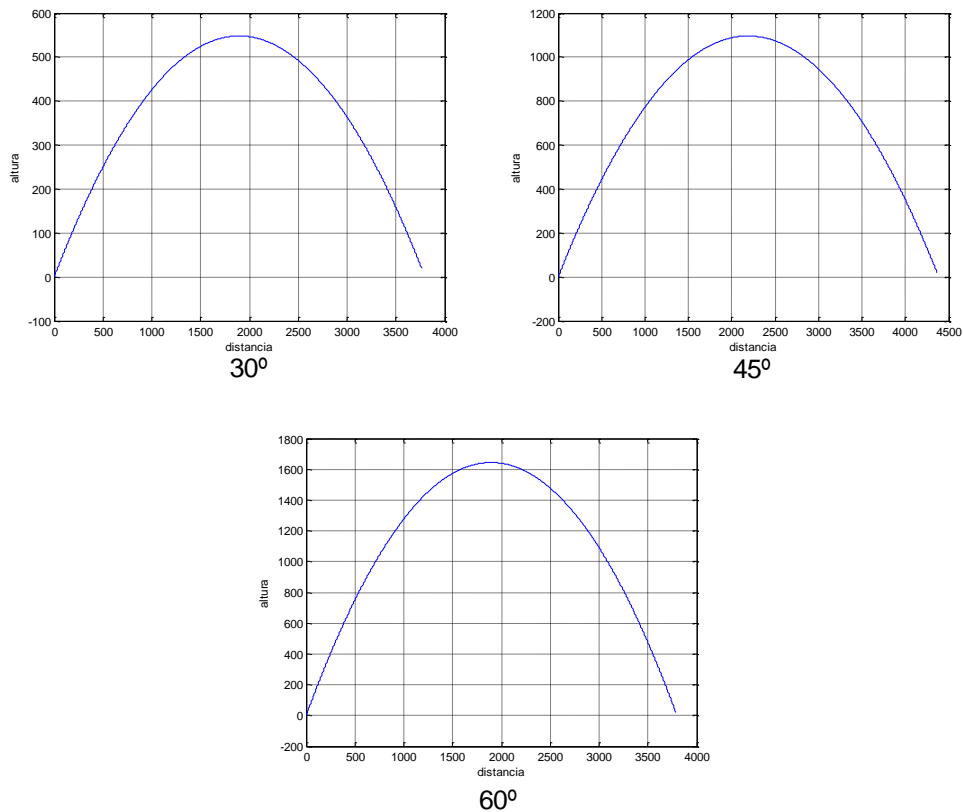


Figura 2. 7: Lançamento de projectil sem resistência do ar

2.2.2- Trajectória da munição considerando a resistência do ar

Um dos parâmetros fundamentais para este projecto, consiste no estudo da trajectória real da munição, tendo em consideração praticamente todas as componentes essenciais, para que seja possível a perfeita compreensão da diferença de ângulos com que a munição embate no solo.

Um dos dados conhecidos desde o início do projecto é a massa total da munição, que em unidades do sistema internacional equivale a 43,091 kg, devendo ser tomada em consideração no estudo da trajectória com inserção do atrito provocado pela resistência do ar.

As equações do movimento utilizadas, em quase nada se alteram em relação à situação sem a consideração do atrito, apenas há que introduzir o termo da força de atrito. A força de atrito F_a , para uma munição que se desloca na atmosfera, é proporcional ao quadrado da velocidade e dada por::

$$F_a = f_a v^2 \quad (2.12)$$

em que f_a é o factor de atrito provocado pelo ar na munição, o qual pode ser obtido através da expressão:

$$f_a = \frac{1}{2} \rho C_a A_{projectil} \quad (2.13)$$

na qual ρ é a densidade do ar, tipicamente $\rho = 1,22 \text{ Kg.m}^{-3}$, C_a é o coeficiente de arrasto da munição, que depende da sua forma, e $A_{projectil}$ é a área efectiva da munição disparada pelo obus.

Os valores considerados para o coeficiente de arrasto, já são valores conhecidos e constam nas tabelas de arrasto para a munição de 155mm [14].

Para este projecto não podem ser utilizados tais valores, porque a munição em estudo tem uma configuração do tipo semiesférica. O coeficiente de arrasto a utilizar, varia entre 0,4 e 0,5, enquanto para um projectil do tipo ogiva, figura 2.8, o seu coeficiente é da ordem de 0,144 [15].



Figura 2. 8: Munição 155mm

A figura 2.9 representa a configuração da munição de 105mm, considerada como ideal para o projecto FIREND®. Nos projectos anteriormente realizados para a munição de 105mm, a parte do subsistema espoleta era toda constituída em aço, mas ao operar com *lasers* há a necessidade de haver uma parte transparente à emissão e recepção óptica, mas não deve haver alteração do seu formato original.

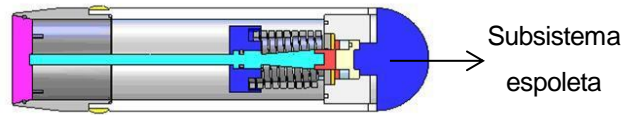


Figura 2. 9: Munição FIREND 105mm

2.2.2.1-Trajectória vertical

Para este tipo de trajetória, tal como para o caso sem resistência do ar, a componente horizontal é desprezada, pelo que, será apenas analisada a componente vertical. As forças que actuam sobre a munição durante a trajetória, podem ser descritas por:

$$F = ma_y \Leftrightarrow F = -f_a v_y^2 - mg \quad (2.14)$$

através da qual é obtida a expressão para o calculo da aceleração da gravidade sofrida pela munição, na trajetória vertical:

$$a_y = -g - \frac{f_a}{m} v_y^2 \quad (2.15)$$

A simulação efectuada, demonstra que a trajetória não sofre alterações ao longo da sua trajetória.

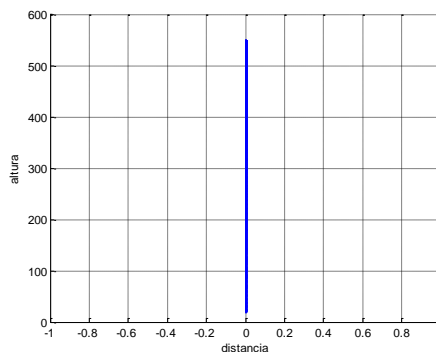


Figura 2. 10: Trajetória para uma queda na vertical com atrito

2.2.2.2-Trajectória oblíqua

No caso deste projecto, é essencial o estudo da trajetória efectuada por uma munição, numa condição muito aproximada daquela a que a munição estará sujeita num lançamento real. O problema de um lançamento oblíquo com resistência ao ar é simulado, adoptando o seguinte modelo:

$$F = ma_x \Leftrightarrow F = -f_a |v| v_x \quad (2.16)$$

através da qual, é obtida a expressão para a componente horizontal da aceleração:

$$a_x = -\frac{f_a}{m}|v| v_x \quad (2.17)$$

Quanto à componente vertical da aceleração (a_y), esta é obtida através da seguinte expressão:

$$a_y = -g - \frac{f_a}{m}|v| v_y \quad (2.18)$$

A simulação do movimento realizado por uma munição permitiu obter os seguintes resultados:

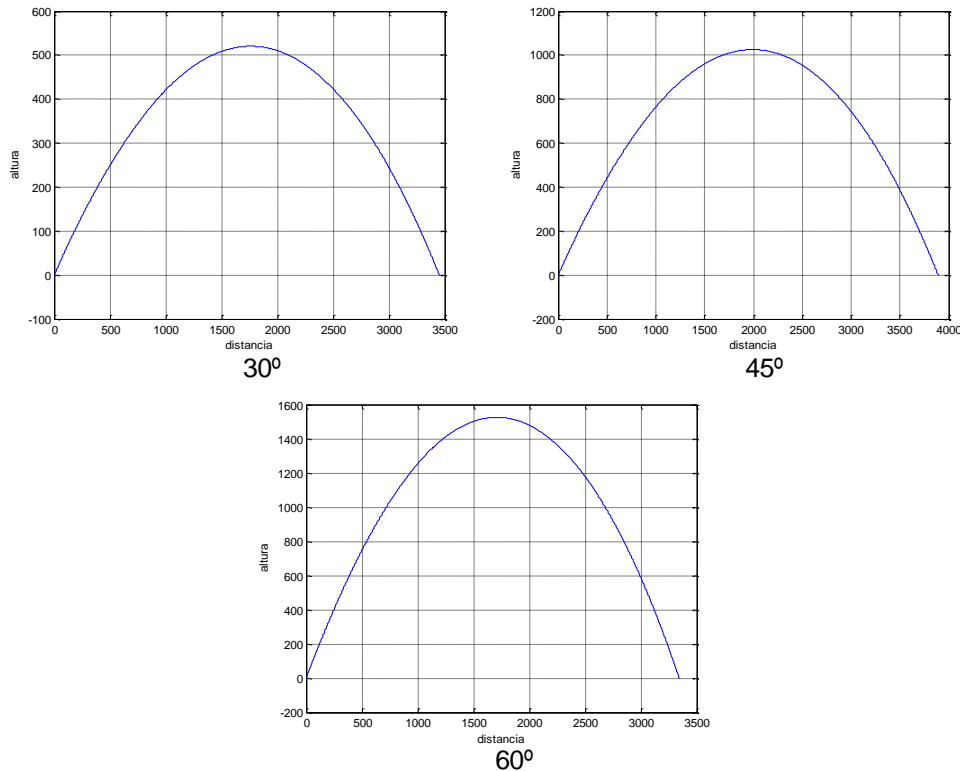


Figura 2. 11: Lançamento para os vários ângulos, considerando o atrito do ar para uma munição, do tipo ogival

Confrontando os resultados obtidos no simulador, com as tabelas de tiro usadas pela artilharia, há uma diferença mínima, praticamente desprezável [16]. Esta diferença é devida, ao facto de não se ter em conta as correcções necessárias devido às estrias do obus, nem as correcções devidas à possível existência de vento.

A munição FIREND[®] para a execução deste projecto tem uma configuração do tipo semiesférica, figura 2.9, exigindo a introdução do denominado coeficiente de arrasto, com um valor de $C_a = 0,5$ [15], na equação da força de atrito, ou seja, equação 2.12.

Com a introdução deste último parâmetro, é possível determinar, com grande aproximação, quais os valores para os ângulos de queda que a munição faz com o solo.

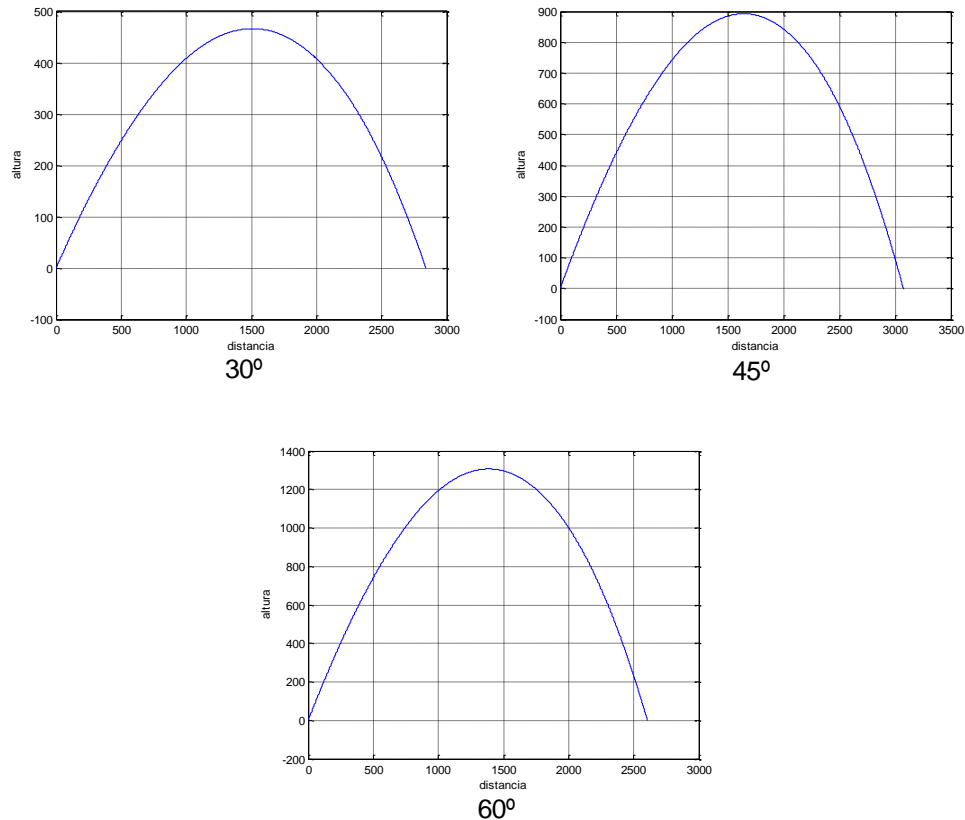


Figura 2. 12: Lançamento do projectil considerando o atrito do ar para uma munição do tipo esférica

É facilmente perceptível através da comparação das figuras anteriores, figura 2.12, que ao utilizar um coeficiente de arrasto superior, o alcance diminui. Para além da diminuição do alcance, a munição cai de forma mais perpendicular ao solo.

2.2.3. Curva de segurança

Quando há fogos reais executados por parte da artilharia, é sempre definida uma curva de segurança, o que significa que nenhuma aeronave pode voar naquele espaço aéreo enquanto estiver a ser executado tiro.

A curva de segurança depende da altura máxima e do alcance máximo da munição. Quando se mantêm constantes as condições de carregamento e se faz variar o ângulo de projecção, constata-se que o alcance atinge o máximo para um valor do ângulo próximo dos 45° e que a partir daí diminui o alcance até se anular para $\theta = 90^\circ$. Com um ângulo de 45°, definimos o alcance máximo que a munição consegue atingir, enquanto com um ângulo de 90°, definimos a altura máxima que a munição pode atingir. Usando alguns valores intermédios, define-se a curva de segurança, a qual é representada na figura 2.13.

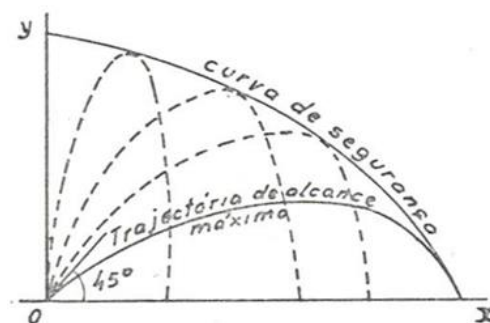


Figura 2. 13: Curva de segurança

A linha de referência, para o projecto em estudo, devido às considerações impostas, será efectuada apenas segundo os ângulos de 45° e 60° . O ângulo de 30° , não é tomado em consideração, pois este não atinge uma altura superior ao ângulo de 60° , nem um alcance superior ao ângulo de 45° .

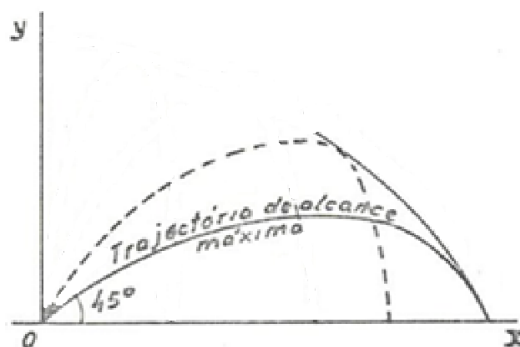


Figura 2. 14: Curva de segurança para os ângulos de 45° e 60°

2.3. Estimativa de distâncias

Os métodos mais utilizados comercialmente para a medição de grandes distâncias, são a telemetria por comparação de fase e a telemetria por impulsos. A telemetria por comparação de fase tem como principal função, a precisão na medição das distâncias, enquanto a telemetria por impulsos privilegia a rapidez de resposta por parte do sistema.

2.3.1- Telemetria por comparação de fase

Na telemetria por comparação de fase, há a necessidade de uma emissão contínua por parte do emissor. O emissor emite um feixe modulado sinusoidalmente em amplitude para várias frequências. Através da defasagem entre a onda emitida e a reflectida é possível determinar a que distância se encontra o objecto.

Este tipo de telemetria apresenta normalmente um erro de medida muito baixo, o qual geralmente é da ordem dos milímetros por quilómetro (mm/Km).

Um dos inconvenientes deste tipo de telemetria, para a não utilização no sistema de altimetria estudado a colocar na munição, deve-se ao facto do seu processamento de sinais ser mais demorado, quando comparado com os sistemas de funcionamento de telemetria por impulsos.

2.3.2- Telemetria por impulsos

A telemetria por impulsos utiliza o princípio do tempo de voo para a determinação da distância. O laser emite um impulso luminoso de curta duração na direcção do objecto, o qual inicia o contador no receptor. Quando o impulso, através da reflexão no objecto atinge o foto-receptor, o contador no receptor é parado. Através da duração de tempo t_c , que vai desde a emissão do impulso até à sua volta, é possível determinar a distância a que o objecto se encontra do sistema. O tempo de voo de um impulso é obtido, através da seguinte expressão:

$$t_c = \frac{2D}{c} \quad (2.19)$$

na qual t_c é o tempo de ida e volta ao alvo, c é a velocidade da luz ($299\,792\,458\text{ m.s}^{-1}$ [17]) e D é a distância entre o emissor e o alvo, como demonstrado na figura 2.15.

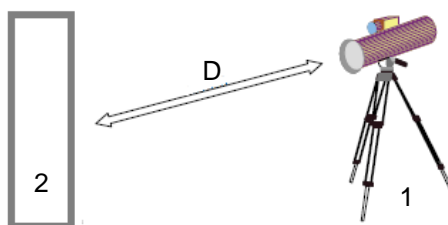


Figura 2. 15: Sistema que utiliza telemetria (1), Objecto a detectar (2)

A distância ao objecto é determinada através da seguinte expressão:

$$D = \frac{ct_c}{2} \quad (2.20)$$

Neste tipo de telemetria, é de extrema importância a frequência utilizada pelo contador. Este tem como função contar o tempo que demora o processo desde a emissão do impulso, até ao seu retorno. A variação da distância mínima (ΔD_{min}) que pode ser discriminada, é definida pelo período de funcionamento do contador, e pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$\Delta D_{min} = cT_R \quad (2.21)$$

na qual, T_R é o período de funcionamento do relógio.

As principais características da telemetria por impulsos são: a rapidez com que consegue efectuar as leituras de distâncias, a reduzida dimensão e a robustez oferecida, características importantes para aplicações militares.

A figura 2.16 representa a montagem de um sistema que opera utilizando a telemetria por impulso. Estes sistemas são compostos por duas partes principais, a parte da emissão do impulso e a parte da sua recepção, vinda através da reflexão no alvo.

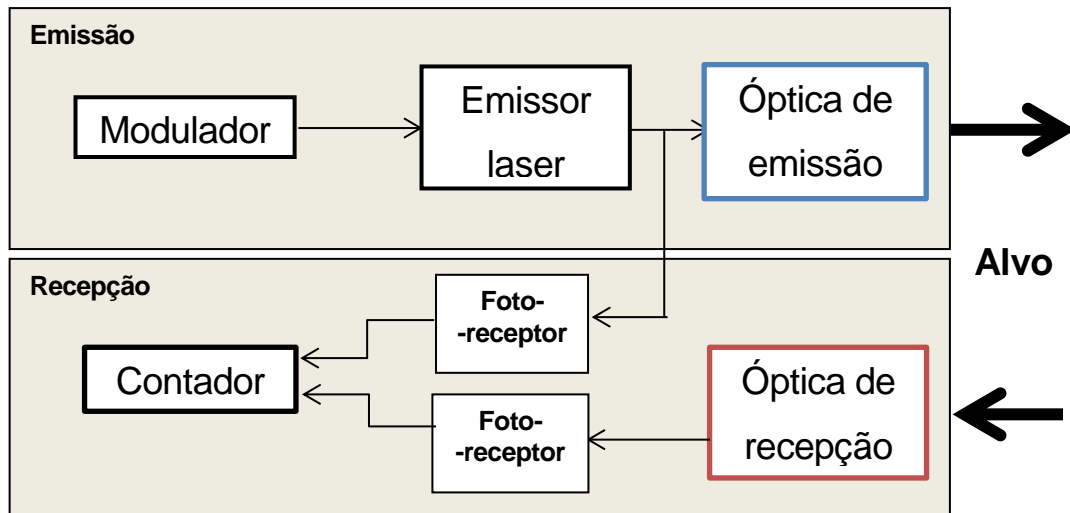


Figura 2. 16: Diagrama de blocos de um sistema de telemetria por impulso

A parte do emissor é composta pelo modulador do laser, o qual é o responsável por enviar um impulso de corrente para o laser, para que este esteja a emitir durante um determinado período de tempo. Existem duas possibilidades para a escolha do laser a utilizar nestes sistemas. A primeira consiste em utilizar um laser que já incorpora um foto-díodo, figura 2.17, para que este dê início à contagem do tempo que vai desde a emissão de um impulso, até à sua reflexão.

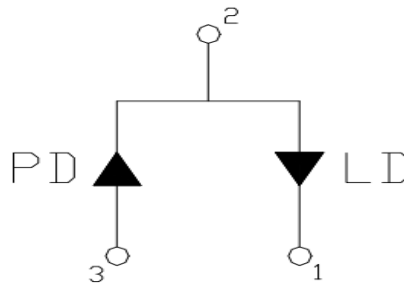


Figura 2. 17: Esquema de um díodo laser (LD) com foto-díodo (PD) incorporado

Uma outra possibilidade será a utilização de um foto-díodo em separado do laser, o qual tem a mesma função. A parte da óptica de emissão é a responsável pela colimação do feixe emitido pelo laser.

A parte da recepção, deve ser constituída por uma lente, a qual tem como função colimar o feixe que retorna na direcção do sistema após a reflexão no alvo, para o foto-díodo constituinte do foto-receptor. Através do sinal produzido pelo foto-díodo e depois de amplificado, se este for suficiente é parada a contagem. Através do tempo (t_c) que vai desde a emissão do impulso, até à sua volta, é possível determinar a distância (D) a que o sistema se encontra do alvo.

2.3.2.1- Exemplo do uso da telemetria por impulsos

Para sistemas de determinação de medida para os quais, o alvo e o sistema de medição estão parados, o tempo que o impulso de luz emitido pelo laser demora a percorrer o caminho de ida até ao alvo e voltar até ao foto-receptor, é dado pela seguinte tabela:

Tabela 2. 1: Tempo de ida e volta de um impulso.

Velocidade da luz (m.s^{-1})	Distância (m)	Tempo de ida e volta do impulso (ns)
299792458	20	133,426

Quanto à incerteza de medida, neste tipo de sistemas, está relacionada com a frequência a que o relógio está a trabalhar.

A distância mínima que pode ser discriminada pelos sistemas, que usam telemetria por impulsos, é determinada pelo período de funcionamento do relógio, expressão 2.19.

Tabela 2. 2: Valores a utilizar como período de relógio

Distância discriminada (m)	Período do relógio (ns)
0,3	1
0,5	2
1	3,34
1,5	5

A tabela 2.2 representa alguns valores, para a escolha do período de funcionamento do relógio. O ideal será ter a melhor precisão, pelo que, deve ser escolhido um período de funcionamento de relógio mais baixo. A precisão da medida não está apenas dependente do período de funcionamento do relógio (T_R), esta depende também do tempo de subida de um impulso (t_r). No capítulo 4, será descrito quais as considerações a verificar para determinar a distância mínima possível de discriminar por um sistema deste tipo.

2.3.3- Erros inerentes aos sistemas que utilizam a telemetria

Todos os sistemas de determinação de distâncias electrónicos têm associados erros, independentemente de utilizar o princípio de telemetria por impulso ou pela comparação de fase. Os erros têm várias origens, podem resultar de limitações dos instrumentos de medida e dos dispositivos ópticos e electrónicos ou das condições do meio onde se propaga a radiação e podem assim ser divididos em duas categorias, instrumentais ou não dependentes dos instrumentos.

As causas dos erros instrumentais são por exemplo:

- O período de relógio;
- O tempo de subida do laser (rise time);
- Erro devido ao multicaminho, ou seja, recepção de ecos parasitas vindos da direcção do alvo ao qual se pretende determinar a distância;

As causas dos erros não dependentes dos instrumentos são por exemplo:

- Turbulências atmosféricas (chuva, granizo);
- O efeito da temperatura atmosférica;
- Diferentes tipos de terreno que possuem diferentes coeficientes de reflexão;

2.4- Propriedades dos *lasers*

A palavra laser é um acrónimo constituída pelas iniciais da expressão inglesa Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (amplificação da luz por meio de emissão estimulada de radiação).

O laser é um aparelho que serve para a produção de raios luminosos muito intensos na região espectral dos infravermelhos, na visível e na dos ultravioletas.

O seu princípio de funcionamento é semelhante ao MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

Tradicionalmente os *lasers* classificam-se em quatro grupos principais segundo o tipo de meio material utilizado: gás, líquido, sólido ou semiconductor.

Os *lasers* distinguem-se das fontes luminosas convencionais porque a sua radiação emitida apresenta as seguintes propriedades:

- Luz monocromática – a luz proveniente de um laser, tem uma banda espectral $\Delta\lambda$ muito pequena em torno de um comprimento de onda λ_0 , ou seja, $\lambda_0 \gg \Delta\lambda$. Deste modo a luz emitida corresponde aproximadamente à cor espectral correspondente a λ_0 .
- Coerência – a coerência é uma propriedade das ondas que indica a capacidade para interferirem com outras. Duas ondas coerentes podem ser combinadas para produzir um padrão visível. No caso concreto do laser, é devido à sua coerência, que se pode observar a sua luz a tanta distância do emissor.
- Directividade – a energia luminosa concentra-se num ângulo sólido de pequena abertura. Quanto mais directiva for a fonte de luz, menor será a área iluminada no objecto. Por vezes, há a necessidade de colocação de lentes para esse efeito, nomeadamente quando o emissor de radiação laser for um díodo laser de semiconductor.

Capítulo 3

3.Simulação

Após efectuado o estudo para a trajectória da munição, chega o momento de efectuar todo um estudo para um sistema capaz de medir distâncias, para uma possível colocação na munição.

O objectivo deste capítulo consiste em executar todo o estudo teórico para o funcionamento dos sistemas de medição de distâncias, assim como construir um programa de simulação, para que haja uma melhor compreensão do funcionamento do bloco de emissão e de recepção.

O objectivo do sistema é determinar o instante em que a munição se encontra a 20m de altura. Para a execução da simulação deste projecto é definido que, o sistema começa a emitir impulsos quando 80% do tempo de voo total da munição já está efectuado, figura 3.1. Na parte ascendente da trajectória a localização do sistema de altimetria na munição não permite a obtenção de medidas da altura. A partir do momento em que se atinge a altura máxima é possível começar a obter medidas da distância ao solo. Se se admitir que o local de disparo e o local de impacto estão aproximadamente à mesma altitude é razoável impor o critério referido, iniciando-se as medidas a uma altura da ordem das centenas de metros,

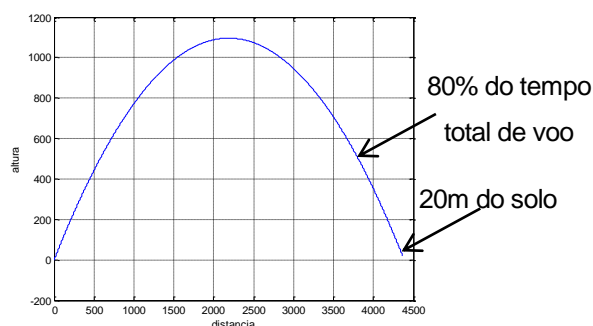


Figura 3. 1: Início de emissão de impulsos e início de ejeção do químico

3.1- Área iluminada pela radiação laser no solo

Quando há o lançamento de uma munição, esta pode executar, uma de muitas trajectórias possíveis. O que mais influencia na trajectória é o ângulo do seu lançamento e a velocidade inicial de lançamento.

Para o estudo efectuado, são consideradas duas formas distintas de lançamento, ou seja, as duas trajectórias já referidas no capítulo 2, ortogonal ao solo ou trajectória oblíqua.

Consoante o tipo de lançamento da munição escolhido, este faz com que a área iluminada no solo seja diferente. Por exemplo, quando escolhido o tipo de queda vertical, a área iluminada pela radiação laser será do tipo círculo perfeito, devido ao ângulo formado pelo centro do feixe laser e o solo ser de exactamente 90°. Quando se considera uma trajectória oblíqua, os ângulos de queda vão sendo constantemente alterados, formando uma área iluminada no solo, do tipo elipse.

Para uma melhor percepção dos tipos de áreas iluminadas pela radiação laser no solo, conforme o deslocamento da munição, é utilizada a figura 3.2 a qual representa a imagem geométrica: o cone. Quando este é intersectado por um plano paralelo ao emissor, a figura geométrica formada é um círculo, ou seja, representa a queda na vertical. Quando há uma ligeira alteração do ângulo do plano que intersecta o cone, a figura geométrica resultante, é uma elipse, ou seja, todos os outros tipos de trajetórias possíveis de serem executados por uma munição.

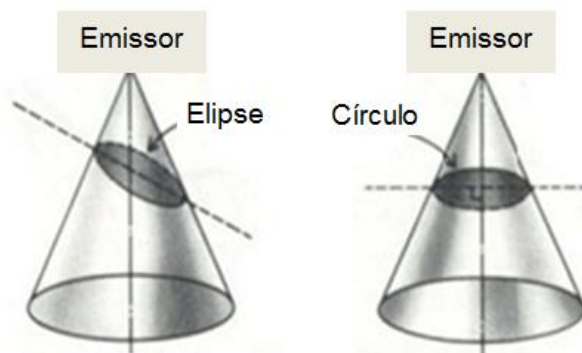


Figura 3. 2: Obtenção do círculo e de uma elipse através de um cone

A expressão que permite calcular a área do círculo, é dependente apenas do raio (r), que representa a radiação laser a iluminar o solo, e pode ser expressa por:

$$A_{circ.} = \pi r^2 \quad (3.1)$$

Uma das aplicações para esse tipo de área iluminada, pode ser resultante do lançamento de uma munição por uma aeronave, do tipo helicóptero, como descrito anteriormente, no início do capítulo 2.

Para a munição FIREND[®], há a necessidade do estudo da área do tipo elipse, devido à trajetória resultante do lançamento da munição por um obus.

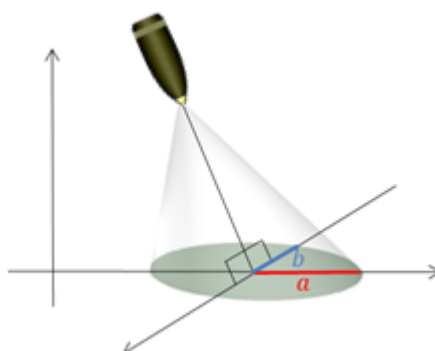


Figura 3. 3: Área iluminada por uma munição a descrever uma trajetória oblíqua

Através da área da elipse é possível determinar os valores de uma forma mais aproximada, aos valores obtidos em condições reais.

Para a expressão que permite calcular a área da elipse, há dois parâmetros a ter em atenção, o raio maior da elipse (a) e o raio menor (b), os quais podem ser observados na figura 3.3, através dos quais podemos obter a seguinte expressão para o cálculo da área da elipse:

$$A_{elip.} = \pi ab \quad (3.2)$$

Os cálculos iniciais para a trajectória da munição, não entravam em consideração alguns dos factores existentes, tais como o atrito do ar, o que dá origem a uma trajectória do tipo parábola perfeita. Como exemplo, é retirada do simulador a figura 3.4, resultante para a trajectória de uma munição lançada com um ângulo de 45° , e sem considerar o efeito da resistência do ar sobre a mesma:

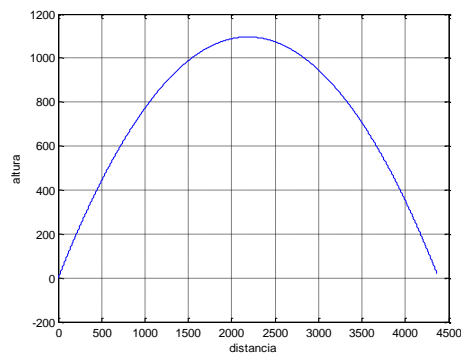


Figura 3. 4: Trajectória para uma munição sem considerar o atrito

Quando se considera o efeito da resistência do ar sobre a munição, a trajectória deve ser dividida em duas partes distintas, ou seja, a parte da subida e a parte da descida. Através das figuras, retiradas do simulador para um ângulo de lançamento de 45° , é possível observar a diferença de altura atingida, assim como o alcance.

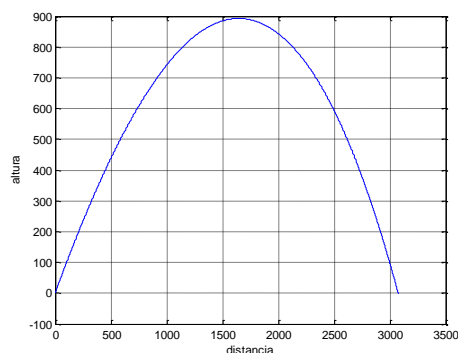


Figura 3. 5: Trajectória de uma munição, considerando o atrito

Para a determinação dos vários ângulos formados entre a munição e o solo, recorreu-se à construção de algumas tabelas em Excel com os resultados obtidos através do simulador construído, as quais têm como parâmetros de entrada:

- velocidade resultante da componente horizontal (v_x) e a da vertical (v_y);
- ângulo formado entre a munição e o solo (θ_s);
- ângulo de queda (θ_q);

- altura da munição ao solo para o primeiro impulso emitido pelo sistema ($h_{80\%}$);
- ângulo de abertura do feixe é um valor constante (2mRad);
- atrito do ar;

Através da figura 3.6, é possível observar todos os parâmetros considerados para o cálculo da radiação laser no solo.

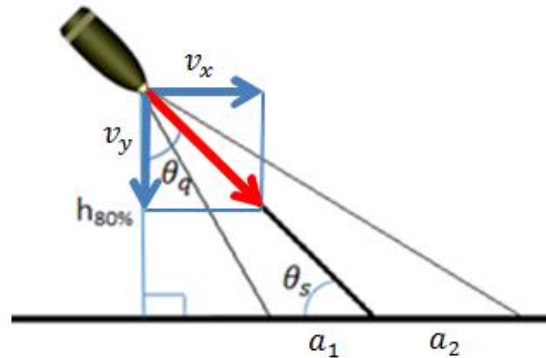


Figura 3. 6: Parâmetros considerados para determinação da área iluminada

Para a construção das tabelas, foi considerada a construção geométrica, demonstrada na figura 3.7:

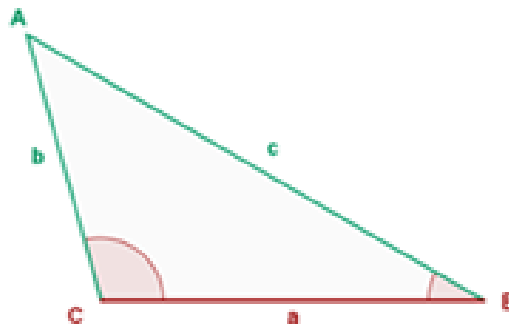


Figura 3. 7: Lei dos senos

Considerando um ângulo de abertura para o feixe constante e de valor $\theta = 2\text{mRad}$, consegue-se determinar a inclinação, com que, a munição executa a fase descendente da trajetória. Através da figura 3.7, é possível deduzir a seguinte equação:

$$\frac{a}{\sin A} = \frac{b}{\sin B} = \frac{c}{\sin C} \quad (3.3)$$

a qual nos permite calcular a área iluminada no solo pela radiação laser do tipo elipse.

Para determinar o ângulo de queda, utiliza-se o vector da velocidade como sendo coincidente com o ponto de emissão do sistema de altimetria, dando assim a indicação do caminho seguido pelo feixe do laser até ao solo. Através da decomposição do vector da velocidade, é possível calcular o ângulo de queda (θ_q) como sendo o arco cuja tangente é o cociente das componentes do vector velocidade v_x e v_y :

$$\theta_q = \tan^{-1} \frac{v_x}{v_y} \quad (3.4)$$

Quando se considera uma trajectória da munição sem a consideração do atrito, os vectores da velocidade têm a equação descrita em 2.5 para a velocidade na horizontal e na equação 2.8 para a velocidade na vertical.

Para a obtenção do ângulo formado entre o centro do feixe laser e o solo, utiliza-se a seguinte expressão:

$$\theta_s = 180 - 90 - \theta_q \quad (3.5)$$

na qual θ_q corresponde ao ângulo de queda, formado entre a altura medida na vertical e o feixe emitido pelo laser, como ilustrado anteriormente na figura 3.6.

A tabela 3.1 foi elaborada em Excel através dos valores obtidos com o simulador, no qual foi utilizada a trajectória da munição com atrito para um ângulo de lançamento de 45°. Os três valores iniciais representam o momento em que a munição já efectuou cerca de 80% de toda a sua trajectória, e inicia a emissão de impulsos. Os últimos cinco valores representam o momento em que a munição está muito próxima dos 20m, ou seja, a altura considerada como ideal para a libertação da substância química.

Tabela 3. 1: Valores obtidos para os semieixos da elipse

vx	vy	Ângulo de queda (graus)	Ângulo no solo (graus)	Altura ao solo (m)	Comprimento do feixe (m)	a (m)	b (m)
99,161	79,074	51,430	38,570	543,399	871,573	1,396	0,873
99,144	79,159	51,395	38,605	542,608	869,642	1,392	0,871
99,127	79,244	51,360	38,640	541,816	867,713	1,388	0,869
90,124	120,221	36,857	53,143	24,821	31,021	0,039	0,032
90,106	120,295	36,835	53,165	23,619	29,510	0,037	0,031
90,088	120,369	36,812	53,188	22,415	27,998	0,035	0,029
90,070	120,443	36,790	53,210	21,211	26,486	0,033	0,028
90,052	120,517	36,768	53,232	20,006	24,974	0,031	0,026

3.2- Conceito de reflexão

A forma como a radiação electromagnética se comporta, ao embater no alvo, é praticamente a mesma, independentemente do comprimento de onda em que o sistema opera. O importante neste tipo de sistemas, é saber qual é de facto a componente da radiação electromagnética que deixa o alvo e volta na direcção do sistema, para assim ser possível determinar a distância.

A reflexão da luz num objecto consiste na alteração da direcção da propagação de um raio (de uma onda) ao incidir na superfície de separação de dois meios, propagando-se a onda incidente e a reflectida no mesmo meio. Se a rugosidade da superfície for comparável ao comprimento de onda da radiação incidente,

obtem-se reflexão difusa, isto é, os raios devolvidos encontram-se distribuídos em todas as direcções, como é possível verificar pela figura 3.9.

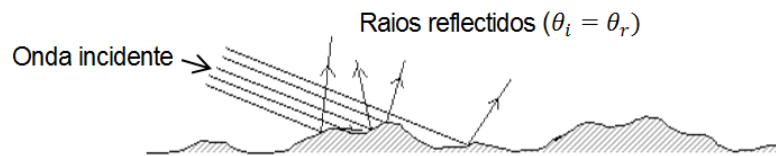


Figura 3. 8: Reflexão difusa

Pelo contrário, se a rugosidade for muito inferior ao referido comprimento de onda, produz-se então uma reflexão propriamente dita, na qual se cumpre a lei de reflexão (ângulo de incidência igual ao ângulo de reflexão), a qual pode ser visualizada na figura 3.9.

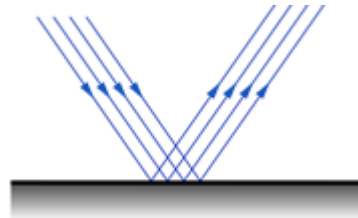


Figura 3. 9: Reflexão de impulso em alvo cooperativo

Geralmente só se reflecte uma parte da radiação incidente, dado que a outra penetra no meio sobre cuja superfície incide e ali é refractada. Contudo, se o raio ultrapassa um determinado ângulo limite, produz-se a chamada reflexão total.

Para o estudo efectuado, apenas serão utilizadas reflectores difusos quase perfeitos, e os reflectores difusos perfeitos (Lambert).

A figura 3.10 representa um plano difusor quase perfeito, o qual apresenta quase sempre a mesma radiação ou brilho em todas as direcções, definida pela razão entre a intensidade emitida, dividida pela área de emissão. O máximo de radiação neste plano difuso, é obtido para um ângulo de reflexão com a mesma amplitude que o ângulo de incidência.



Figura 3. 10: Difusor quase perfeito

A potência reflectida por uma superfície do tipo difusor quase perfeito é obtida através da seguinte expressão:

$$P_{Reflectida} = \frac{R\Gamma P_{Laser}}{\pi} \quad (3.6)$$

na qual Γ corresponde ao factor de transmissão da atmosfera, R o coeficiente de reflexão do solo e P_{Laser} , a potência de emissão do laser.

Uma fonte de Lambert segue a lei do coseno, ou seja, a superfície apresenta sempre a mesma radiação ou brilho em todas as direcções, definida pela razão entre a intensidade emitida, dividida pela área de emissão. A intensidade detectada pelo sistema de altimetria varia em função do ângulo polar θ com que o sistema se aproxima do solo. Quanto menor for o ângulo formado entre a radiação emitida pelo laser e o solo, menor será a intensidade recebida no sistema de altimetria. Portanto, a irradiação ou brilho da fonte, são sempre os mesmos, pois a radiação que o observador consegue detectar será sempre a razão entre a intensidade máxima, dividida pela área máxima [18] .

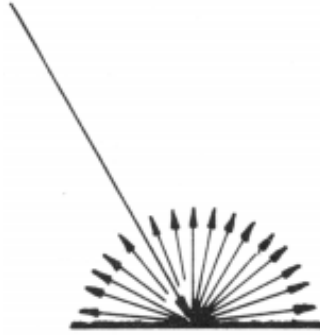


Figura 3. 11: Difusor perfeito (Lambert)

Potência reflectida por uma superfície de Lambert

$$P_{Reflectida} = \frac{R\Gamma P_{Laser}}{2\pi} \quad (3.7)$$

O factor de reflexão a considerar, será obtido a partir do coeficiente de reflexão de *Fresnel* (R), para a polarização horizontal. A seguinte expressão é a adoptada para o estudo da polarização horizontal:

$$R_h = \frac{\sin \theta_s - \sqrt{n^2 - \cos^2 \theta_s}}{\sin \theta_s + \sqrt{n^2 - \cos^2 \theta_s}} \quad (3.8)$$

na qual n é o índice de refração do solo em relação ao ar, θ_s é o ângulo de incidência no solo, como demonstrado na figura 3.11.



Figura 3. 12: Polarização horizontal

o qual dá origem a um índice de refração com a seguinte expressão :

$$n = \sqrt{\varepsilon_r - j60\sigma\lambda} \quad (3.9)$$

retirada de [19], na qual ε_r é permitividade relativa da superfície e σ_s a condutividade da superfície reflectora.

Sempre que há perdas no material, neste caso o solo, o índice de reflexão, passa a ter um valor imaginário, dando origem a que o coeficiente de reflexão no solo seja um número complexo, pelo que, é considerado somente o módulo do factor de reflexão ao quadrado, ou seja, $|R_h|^2$.

A tabela 3.2 é retirada de referência [20] e contém valores de referência para alguns tipos de terreno padrão:

Tabela 3. 2: Valor de referência para alguns tipos de terreno

Meio	ε_r	σ (condutividade)
Água do mar	72-80	4
Água doce	81	10^{-3}
Terreno húmido	12	8×10^{-3}
Terreno seco	2,5-3,5	2×10^{-3}

Após ser determinado o tipo de terreno para o alvo não-cooperativo, pode-se calcular o valor da potência reflectida pelo solo através da seguinte expressão:

$$P_{reflectida} = |R_h|^2 P_{incidente} \quad (3.10)$$

Como valor de referência da permitividade relativa para a simulação será utilizado o valor para o terreno seco (2,5-3,5), dado que, perante esta situação, está a ocorrer um incêndio, o qual não se propaga em terrenos húmidos.

3.3-Simulação considerando a influência da atmosfera e do solo

Neste subcapítulo, será analisada uma queda na vertical da munição e de seguida, uma trajectória oblíqua, como no subcapítulo anteriormente descrito. A diferença em relação ao anterior, é o facto de se ter em consideração a influência do atrito e do solo para a trajectória da munição e para a propagação da radiação emitida pelo laser, respectivamente.

Para a recepção é necessário a determinação da sua óptica de recepção, a qual foi considerada como tendo 10mm de diâmetro.

3.3.1- Modelo para a trajectória vertical

Como referido no capítulo 2, a queda de uma munição na vertical não é comum, mas visto o projecto FIREND® ser uma inovação, deve ser considerada esta nova possibilidade de lançamento. Este tipo de trajectória dá origem a um ângulo formado pelo raio laser com o solo de 90°, o que significa que a munição cai perfeitamente na vertical, fazendo uma perpendicular com o solo.

A figura 3.13 descreve uma trajectória do tipo vertical, assim como os parâmetros necessários para efectuar os cálculos para a área iluminada no solo.

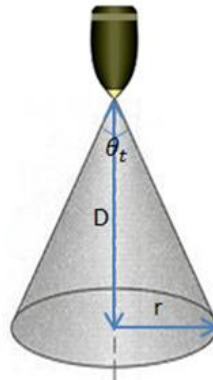


Figura 3. 13: Demonstração da distância ao solo e o raio do círculo

Para determinar a área de radiação do laser no solo, do tipo círculo, pode ser descrita pela seguinte expressão:

$$A_{alvo} = \pi(D\theta + d_{ab})^2 \quad (3.11)$$

na qual D corresponde à altura a que a munição está do solo, θ é o ângulo de abertura do laser e d_{ab} é o diâmetro de abertura do laser.

Quando o coeficiente de transmissão da atmosfera Γ é tomado em consideração, a potência que atinge o solo vinda do emissor laser, é obtida pela seguinte expressão:

$$P_{solo} = P_{Laser}\Gamma \quad (3.12)$$

Para o factor de transmissão da atmosfera até uma milha náutica de altitude para o Atlântico Norte, ou seja, 1,852 Km, o seu valor pode ser considerado constante e igual a $\Gamma = 0,74$, o que significa que 74% da intensidade original da luz se mantém e chega ao solo [21]. O valor utilizado como coeficiente de transmissão da atmosfera, já tem em consideração a dispersão provocada pelas partículas existentes no ar, bem como, a absorção do feixe pela atmosfera.

Assumindo um solo do tipo difusor perfeito, obtém-se a expressão para a potência recebida pelo foto-receptor:

$$P_{F-R} = |R_h|^2 \frac{\Gamma^2 A_r}{2\pi D^2} P_{Laser} \quad (3.13)$$

Na qual D corresponde ao comprimento do feixe, desde o sistema de emissão até ao solo, como possível observar na figura 3.12.

Após determinada a expressão para a potência detectada pelo foto-receptor, é possível calcular as atenuações (L) sofridas pelo feixe laser, para os diferentes ângulos de lançamento, através da expressão:

$$L = 10 \log \left(|R_h|^2 \frac{\Gamma^2 A_r}{2\pi D^2} \right) \quad (3.14)$$

3.3.3.1- Resultados obtidos

Para se proceder à obtenção da atenuação sofrida pelo feixe, é necessário definir uma risca espectral de funcionamento para o laser, para ser possível obter os valores a atribuir ao coeficiente de reflexão do solo 3.9. Optou-se por definir a risca espectral no infravermelho próximo, mais concretamente, optou-se por um $\lambda = 905\text{nm}$.

A seguinte figura 3.14, retirada do simulador, representa a queda de uma munição na vertical sem considerar o atrito e largada de uma altura de 550m. A altura considerada para determinar a potência, que origina a ordem de libertação do químico, foram os impostos para a execução deste projecto, ou seja, 20m do solo.

Os cálculos efectuados têm em consideração o uso de uma lente com o diâmetro de abertura de 10mm.

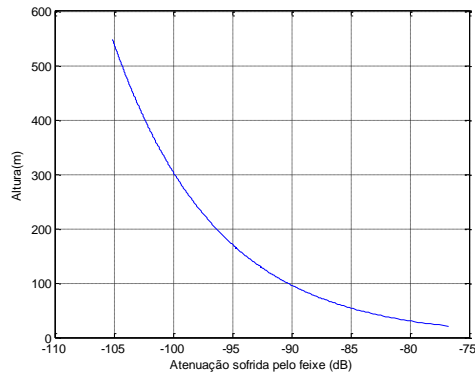


Figura 3. 14: Atenuação sofrida pelo feixe

Como descrito anteriormente, esta não é uma situação normal para o lançamento de uma munição, mas é de extrema importância devido a um possível uso por aeronaves.

Para este estudo, é considerado que a munição efectua uma aproximação ao solo com uma incidência ortogonal, pelo que, o ângulo formado entre o feixe e o solo será de 90° .

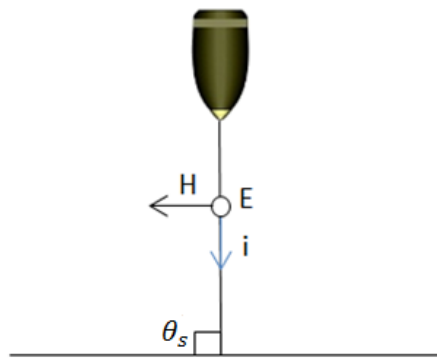


Figura 3. 15: Queda da munição, na vertical

A figura 3.15 representa a atenuação sofrida pelo feixe na trajectória efectuada por uma munição em queda vertical, lançada a 550m de altura, com a introdução dos factores influenciadores á propagação do feixe de radiação laser, ou seja, o coeficiente de reflexão do solo e a atenuação provocada pela atmosfera.

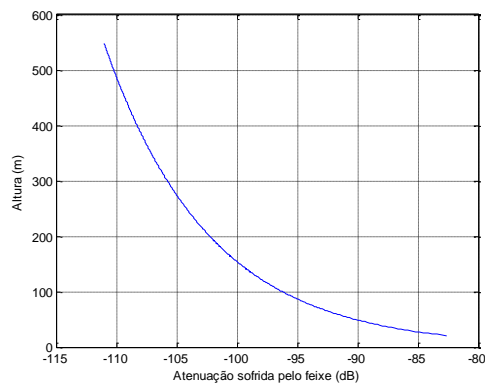


Figura 3. 16: Atenuação do feixe, considerando os factores condicionantes

Para uma melhor percepção dos efeitos causadores de atenuação no feixe emitido pelo laser, é efectuada uma simulação para um emissor laser, de potência igual a $P_{Laser}=75W$. A Figura 3.16 representa a potência recebida no sistema de recepção, em função da altura.

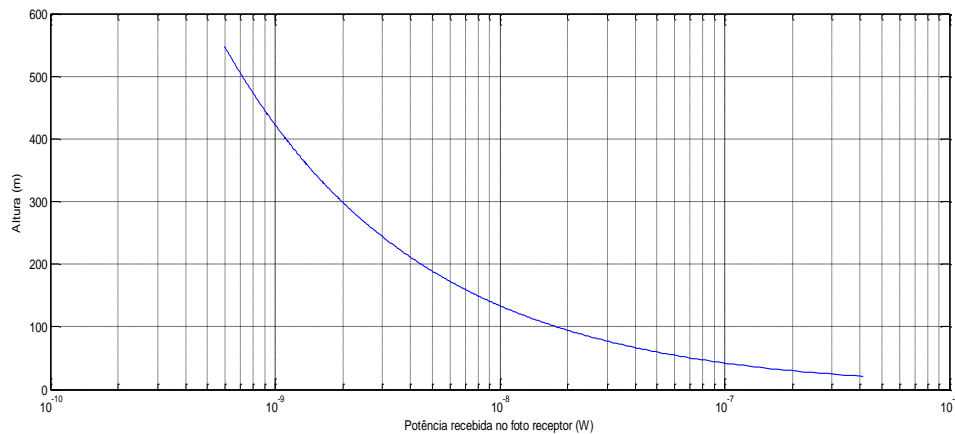


Figura 3. 17: Potência recebida no foto-receptor

Pela análise da figura 3.17, é possível verificar a variação da potência detectada no foto-receptor, desde o início de emissão dos impulsos até atingir a altura ideal de libertação do químico. Para um sistema que utilizasse a potência recebida como base para iniciar a libertação da substância química, verificava-se que quando a potência no foto-receptor fosse igual ou superior a $0.4125\mu W$, a ordem para iniciar a ejeção deveria ser executada. A existência de variações nas condições de transmissão da radiação pela atmosfera e de reflexão pelo solo, não permitem no entanto utilizar este critério..

3.3.2- Modelo para a trajectória oblíqua

Para finalizar o estudo teórico de um sistema de medição de distâncias colocado na munição FIREND[®], foi utilizado o simulador para a análise em condições consideradas muito próximas da realidade, ou seja, foram tomadas em consideração todos os factores referidos como influenciadores da trajectória da munição e o percurso do feixe laser.

As figuras 3.18, 3.19, e 3.20, representam a atenuação da potência detectada pelo foto-receptor, quando a munição se vai aproximando da altura considerada como ideal para a libertação da substância retardante. Os ângulos iniciais de lançamento considerados foram os já citados anteriormente.

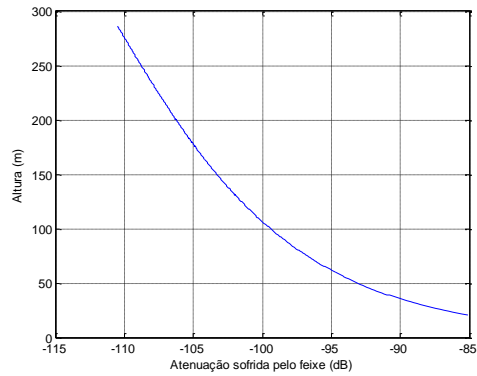


Figura 3. 18: Atenuação sofrida pelo feixe, para um ângulo de lançamento de 30°

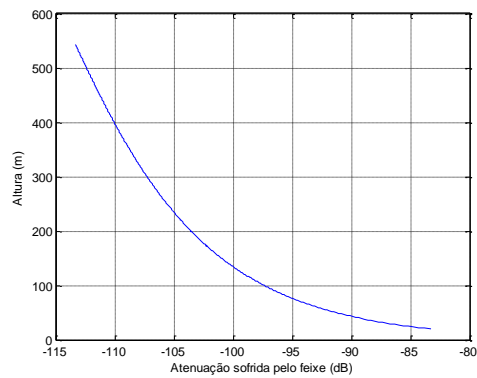


Figura 3. 19: Atenuação sofrida pelo feixe, para um ângulo de lançamento de 45°

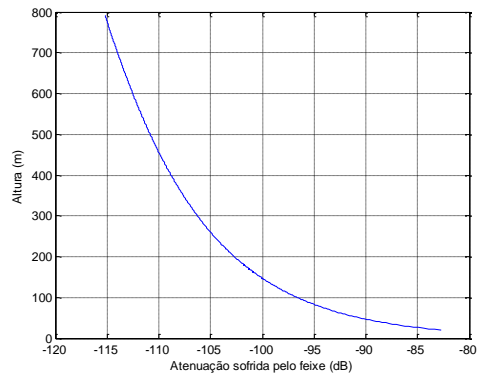


Figura 3. 20: Atenuação sofrida pelo feixe, para um ângulo de lançamento de 60°

Para uma melhor percepção dos efeitos da atenuação sofridos pelo feixe, são elaboradas as tabelas 3.3 e 3.4. A tabela 3.3 representa a atenuação sofrida pelo feixe, quando a munição executa 80% do tempo de voo total, enquanto a tabela 3.4, representa a atenuação sofrida pelo feixe, quando a munição se encontra à altura ideal para iniciar a ejeção do químico.

Tabela 3. 3: Atenuação para 80% do tempo de voo

Ângulo de lançamento da munição (graus)	Altura da munição ao solo (m)	Comprimento do feixe até ao solo (m)	Atenuação quando efectuado 80% do tempo de voo (dB)
30	287,57	707,31	110,52
45	543,40	871,57	113,33
60	792,50	979,59	115,19

Tabela 3. 4: Atenuação a 20m de altura

Ângulo de lançamento da munição (graus)	Comprimento do feixe até ao solo (m)	Atenuação a 20m altura (dB)
30	34,45	85,12
45	24,97	83,29
60	22,03	82,72

Um aspecto relevante, retirado em função dos resultados obtidos no simulador, é o facto de ao ser introduzido o atrito provocado pelo ar sobre a munição, o ângulo de queda aumenta. Esse aumento do ângulo de queda é favorável para este projecto, pois dá origem a uma menor área iluminada pela radiação laser no solo, o que significa que a densidade de potência aumenta, logo há uma maior potência reflectida pelo solo de volta para o foto-receptor.

Capítulo 4

4- Projecto do sistema de altimetria

Nos capítulos anteriores, foram realizadas as análises teóricas e simulações necessárias para a compreensão da trajectória da munição lançada por um obus, bem como o estudo da radiação laser emitida pelo sistema de altimetria da munição, desde que é iniciada a emissão até ao momento em que é detectada pelo receptor. É com base na análise efectuada anteriormente que o sistema de altimetria será projectado.

4.1- Descrição do sistema de altimetria

O sistema de altimetria é constituído por três blocos principais: o emissor, o receptor e o comando, tal como representado na figura 4.1.

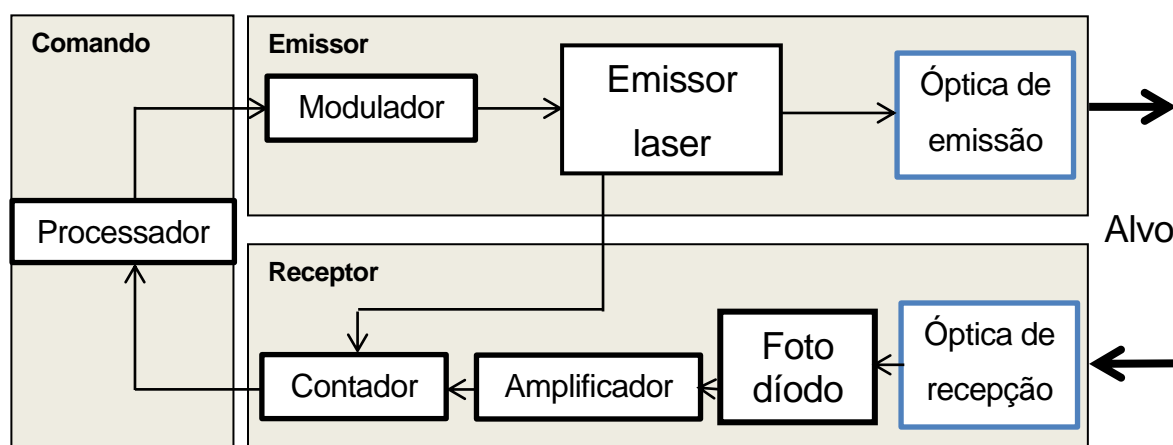


Figura 4. 1: Projecto de um sistema que utiliza a telemetria

Ao longo do presente capítulo, apresenta-se o projecto de cada um destes blocos indicando quais as condições tomadas em consideração para a escolha dos diferentes componentes que os integram.

O sistema de altimetria está instalado na munição, a qual se desloca durante o processo de medida.

A tabela 4.1 representa o tempo de voo até a munição estar à altura considerada como ideal (20m), para a libertação da substância química, assim como, a velocidade da munição à mesma altura.

Tabela 4. 1: Valores para: tempo e velocidade da munição a 20m do solo

Ângulo de lançamento (graus)	Altura ao solo (m)	Tempo de voo (s)	Componente horizontal da velocidade ($m.s^{-1}$)	Componente vertical da velocidade ($m.s^{-1}$)	Velocidade ($m.s^{-1}$)
30	20,33	19,27	120,221	87,897	148,926
45	20,01	26,80	90,052	120,517	150,445
60	20,23	32,50	62,044	144,081	156,872

O sistema de altimetria deve começar o seu funcionamento, quando a munição estiver no seu movimento descendente e já com 80% do tempo de voo concluído. Deste modo, sendo os tempos de voo variáveis entre, aproximadamente 20 e 33s, isso significa que, o intervalo de tempo durante o qual vão ser efectuadas medidas, varia entre os 4 e 7s. Durante esse tempo, a altura a que se encontra a munição é no máximo de 800m do solo, valor que corresponde ao maior ângulo de lançamento (60°). Admitindo-se como razoável que o número mínimo de medidas a efectuar seja de 1000, corresponde a dizer que a duração máxima de cada processo de medida não pode ser superior a 4ms.

Considere-se agora a situação correspondente ao lançamento da munição com um ângulo de fogo de 60° . A altura máxima atingida pela munição ronda os 1300m (ver figura 2.12 c). O sistema de altimetria começa a funcionar quando a munição se encontra a uma altura de 800m (ver figura 3.18). O tempo de percurso, t_c , do raio luminoso emitido pelo laser até ser detectado pelo sistema de recepção é de $6,54\mu s$. O tempo de percurso diminui com a distância ao solo, a 20m de altura o tempo de propagação de um impulso é de 146ns. O valor t_c correspondente a 800m limita portanto o tempo mínimo de cada medida.

Se se desprezar o tempo de funcionamento dos sistemas de emissão, recepção e comando, face ao valor de t_c a 800m de altura, a duração mínima de cada medida é tal como visto anteriormente de $6,54\mu s$. Deste modo, o número máximo de medidas que é possível executar em cada segundo é de aproximadamente 153.000, ou seja, a frequência máxima de medida é inferior a 153kHz.

No capítulo 3 obteve-se, como resultado das simulações efectuadas que, a atenuação máxima sofrida pela radiação entre a emissão e a recepção toma o valor de 115,19dB. Este valor condiciona a escolha do emissor laser e do receptor. Existe sempre um compromisso a observar, no qual, a diminuição da potência máxima do laser exige uma melhoria da capacidade de detecção do foto-díodo e inversamente.

4.1.1- Emissor

O bloco emissor é construído por três partes distintas, (figura 4.2). O modulador de impulsos tem como função enviar uma determinada corrente ao emissor laser, durante um determinado período de tempo. Quando o emissor laser recebe uma corrente suficiente, começa a emitir radiação, a qual é colimada através de uma lente à saída do sistema. A lente colimadora tem como função diminuir o ângulo de divergência da radiação emitida pelo laser.

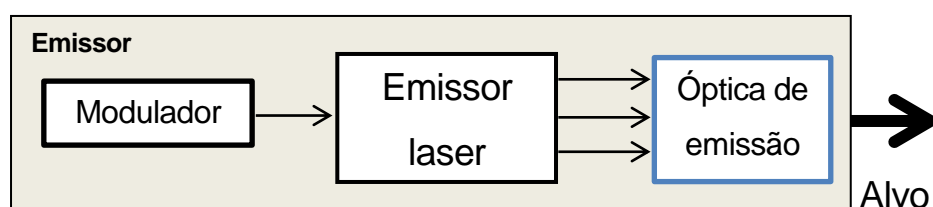


Figura 4. 2: Diagrama de blocos do emissor

4.1.1.1- Modulador de impulsos

O emissor emite os impulsos de radiação laser necessários à determinação da distância. A escolha do modulador determina as características do impulso de luz emitidas pelo diodo laser.

No método de medida de telemetria por impulsos, capítulo 2, de modo a garantir uma boa precisão de medida, os tempos de subida e de descida de cada impulso, devem ser pequenos e da mesma ordem de grandeza de um impulso de relógio do sistema de comando. Admitindo que o relógio tem uma frequência próxima de 1GHz, isso significa que os tempos de subida devem ser da ordem do nano segundo. Sendo o impulso de luz modulado pela corrente, o impulso de corrente também deve verificar a restrição anterior.

Existem *lasers* que já incorporam um modulador, é o caso dos *lasers* SPL LL85 e o SPL LL90 da OSRAM. O seu modulador é constituído por 2 condensadores ligados em paralelo, e um transistor MOSFET, o qual actua como um controlador de estados [22].

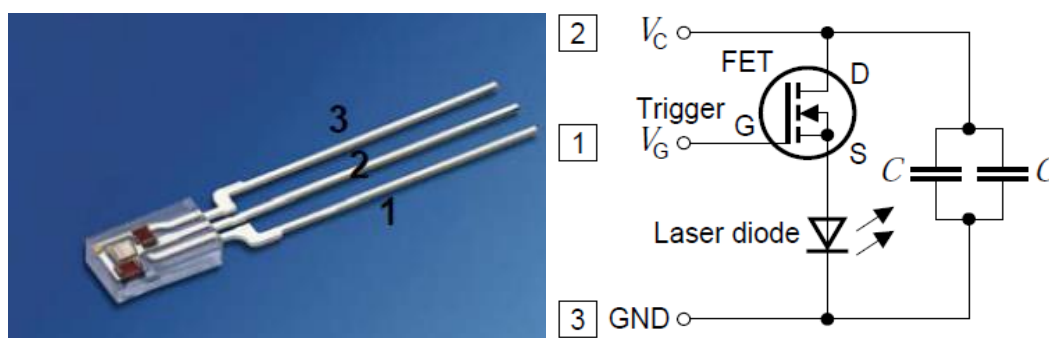


Figura 4. 3: Laser SPL LL da OSRAM

Considerando a hipótese de se utilizar um dos *lasers* referidos anteriormente, basta adquirir um controlador, o qual determina o tempo de duração do impulso emitido. Utilizando o controlador EL7104, do fabricante intersil [23] em conjunto com um dos *lasers* da OSRAM, figura 4.4, é possível obter um impulso de radiação laser com uma duração de aproximadamente 100ns. O impulso considerado já engloba o tempo de subida, a largura do impulso e o tempo de descida. O tempo de subida máximo (t_r) do emissor laser é de 13ns, pelo que, a precisão na medida será da ordem dos 3,9m.

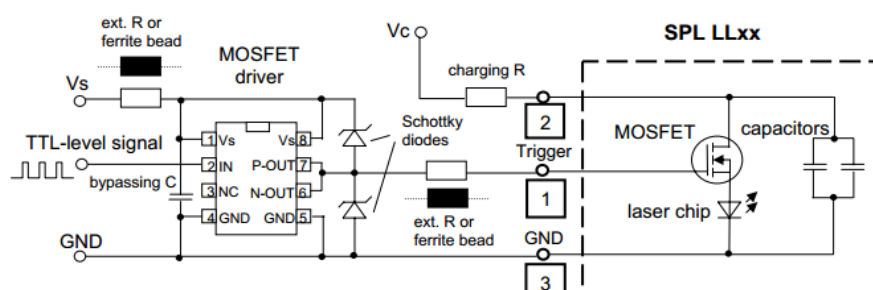


Figura 4. 4: Integrado SPL L90 da OSRAM

Devido à necessidade de arrefecimento do laser, o fabricante limita como frequência máxima a utilizar 25kHz, pelo que, o período decorrente entre a emissão de impulsos é de 40 μ s. Com este período e utilizando como referência a velocidade máxima atingida pela munição (207,3m.s⁻¹), entre a emissão de dois impulsos consecutivos, a munição apenas se desloca 8,29mm. O valor obtido para a deslocação da munição entre a emissão de impulsos consecutivos, pode ser praticamente desprezado, quando comparado com a distância que a munição percorre desde a emissão do primeiro impulso, até atingir a altura ideal (ver tabela 3.3).

Considerando o pior caso, no qual o sistema apenas emite impulsos durante 4s, com a frequência de funcionamento de 25kHz, o sistema pode executar um máximo de 100.000 medidas.

4.1.1.2-Características para a escolha do laser

Quando há emissão de radiação laser por parte do sistema de altimetria, o primeiro meio com o qual este vai entrar em contacto, é a atmosfera terrestre. É de extrema importância conhecer como a radiação laser se comporta na atmosfera, para que se possa escolher o comprimento de onda a utilizar, assim como a potência de emissão do laser.

A tabela 4.2 representa algumas das bandas de absorção da atmosfera, ou seja, representa os gases mais abundantes da atmosfera e os comprimentos de onda para os quais estes se tornam opacos à radiação electromagnética.

Tabela 4. 2: Bandas de absorção da atmosfera terrestre [24]

Gás	Bandas de absorção
O ₂ (oxigénio)	0 – 0,3 μ m
O ₃ (ozono)	5,0 – 9,5 μ m
H ₂ O (vapor de água)	0,7 – 0,8; 3,3; 5,5 – 7,5; 11,9 μ m
CO ₂ (dióxido de carbono)	2,7 – 2,9; 4,1 – 4,2; 9,4; 12,6; 14,0 μ m

Para a escolha do laser a utilizar como fonte de luz no sistema de altimetria, deve-se ter em conta a frequência da luz emitida, procurando-se uma fonte que emita numa das janelas de transmissão da atmosfera.

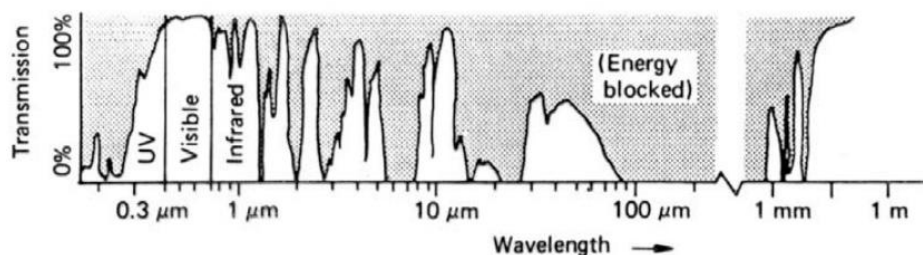


Figura 4. 5: Transmissão dos comprimentos de onda [25]

Os três tipos básicos para a determinação da dispersão sofrida pela luz na travessia da atmosfera até ao solo, são: Rayleigh, Mie e não-selectiva.









































A dispersão de Rayleigh, também conhecida por dispersão molecular, é a mais comum e ocorre quando a luz incidente encontra partículas ou moléculas de tamanho inferior ao comprimento de onda da radiação electromagnética. O efeito da dispersão de Rayleigh é inversamente proporcional à 4ª potência do comprimento de onda. Deste modo, há uma maior tendência para a dispersão dos comprimentos de onda menores, em relação aos comprimentos de onda maiores.

A dispersão de Mie ocorre quando o comprimento de onda de luz incidente é comparável ao tamanho das partículas ou moléculas encontradas, como exemplo, vapor de água, fumo e poeira são as principais causas de dispersão de luz na atmosfera terrestre.

A dispersão não-selectiva afecta todos os comprimentos de onda existentes de forma semelhante. Esta ocorre quando as partículas atmosféricas causadoras da dispersão (água e poeira) são maiores (tipicamente com dimensões entre 5 e 100 μm) que o comprimento de onda da radiação que interage com o meio. Neste processo, quantidades idênticas de luz vermelha, verde e azul são espalhadas, o que origina a que as nuvens e a neblina tenham uma cor branca.

Na tabela 4.3, retirada de [26], é indicado o comportamento da radiação electromagnética para diversas situações na atmosfera.

Tabela 4. 3: Comportamento da radiação electromagnética na atmosfera

Comprimentos de Onda Ambiente	Luz Visível (0,4 a 0,7 μm)	Infravermelho Próximo (0,5 a 1,1 μm)	Infravermelho Distante (3 a 14 μm)	Radar de Microondas (0,1 a 10 cm)
Chuva Leve				
Chuva Moderada				
Chuva Forte				
Neblina				
Alta Umidade Relativa do Ar				
Névoa Seca				
Névoa Úmida				
Fumaça				
Poeira				
 Sem Degradação  Degradação Média. O grau de degradação varia com a distância alvo / sensor  Degradação Severa  Degradação Total				

Segundo a análise da tabela anterior, o sistema de altimetria a colocar numa munição, deve operar na região do infravermelho próximo, ou eventualmente no visível. A escolha é efectuada devido à existência de fumo e partículas emitidas pelo fogo (cinzas) de dimensões superiores ao comprimento de onda.

A seguinte expressão 4.1, retirada de [27], permite calcular a atenuação sofrida num determinado comprimento de onda, por parte da atmosfera.

$$\sigma = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{550nm} \right)^{-q} \quad (4.1)$$

A expressão é definida em função do comprimento de onda (λ) e da visibilidade (V) em Km. Para os valores da dispersão das partículas no ar (q), os valores definidos são os seguintes:

- $q = 1.6$ para visibilidade superior a 50km;
- $q = 1.3$ para uma visibilidade compreendida entre 6km e 50km;
- $q = 0.16V + 0.34$ para uma visibilidade compreendida entre 1km e 6km;
- $q = V - 0.5$ para uma visibilidade compreendida entre os 0,5km e 1km;
- $q = 0$ para distâncias de visibilidade inferiores a 0,5km.

Apresenta-se seguidamente a tabela 4.4, retirada de [27], na qual se mostra o comportamento da radiação correspondente a dois comprimentos de onda utilizados em transmissões ópticas, para diferentes condições de visibilidade utilizando a expressão 4.1.

Tabela 4. 4: Atenuação da atmosfera em função da distância de visibilidade

Visibility (km)	dB/km 785 nm	dB/km 1550 nm	Weather
0.05	340	340	Fog
0.2	85	85	
0.5	34	34	
1	14	10	Haze
2	7	4	
4	3	2	
10	1	0.4	Clear
23	0.5	0.2	

Através da análise da tabela 4.4, é possível verificar que, independentemente do comprimento de onda a utilizar, quando a visibilidade é reduzida, a atenuação sofrida é sempre a mesma.

Na tabela 4.3, de carácter qualitativo, a radiação visível e a do infravermelho próximo têm comportamentos semelhantes nas mesmas condições da atmosfera, excepto na presença de fumo. Na tabela 4.4 quando a visibilidade aumenta, mas existe fumo na atmosfera (haze), há uma variação da atenuação com o comprimento de onda, como descrito qualitativamente em 4.3. Os dados das duas tabelas, devem assim, ser aproximadamente coerentes se se considerar a situação com a existência de fumo, como correspondente à situação descrita em 4.4 com visibilidade entre 2 e 4 km.

Após analisar todos os factores que têm interferência no feixe de radiação emitido pelo laser, chega-se à conclusão de que este deve operar na região espectral do infravermelho próximo. As melhores soluções para este trabalho, são apresentadas pelo fabricante OSRAM através dos emissores laser SPL L90, os quais são bem definidos na risca espectral de $\lambda = 905nm$.

4.1.1.3-Óptica de emissão

O uso de lentes, neste projecto, é de extrema importância. Na emissão há a necessidade de colimar o feixe emitido para que este mantenha as suas características, concentrando assim toda a sua potência numa menor área.

Em óptica, a abertura numérica de um sistema, caracteriza o valor dos ângulos para os quais uma lente pode alterar a direcção de propagação, sem acrescentar distorção ao feixe emitido.

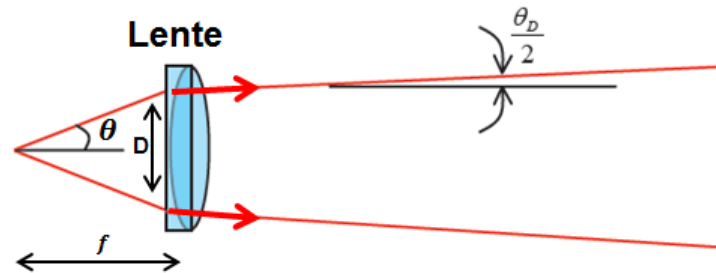


Figura 4. 6: Abertura numérica

Para o cálculo da abertura numérica há a necessidade do conhecimento da distância a que o emissor está colocado da lente colimadora, a qual é caracterizada pela distância focal (f), e também pelo diâmetro útil da lente (D).

A abertura numérica é definida por:

$$NA = n \sin \theta \quad (4.2)$$

Onde n é o índice de refração do meio no qual a lente está inserida (1.0 para o ar, 1.33 para água pura e acima de 1.56 para óleos), e θ corresponde à semiabertura do feixe de luz incidente na lente. Normalmente a expressão para a abertura numérica considera o $n=1$, pois o espaço entre o díodo laser e a lente é preenchido apenas pelo ar. No caso deste projecto, deverá ser tomado em consideração o índice de refração, pois uma forma de a óptica, assim como o díodo, suportarem a aceleração inicial sofrida pela munição, no momento de lançamento, poderá ser através da introdução de algum tipo de material transparente à radiação laser.

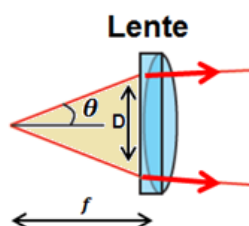


Figura 4. 7: Preenchimento do meio entre o díodo laser e lente colimadora

O ângulo máximo pode ser obtido através da razão entre o diâmetro da lente colimadora e a distância focal.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\frac{D}{2}}{f} \quad (4.3)$$

Os díodos laser de semicondutor apresentam em geral ângulos de divergência para o plano paralelo e o perpendicular diferente, o que origina um feixe emitido do tipo elipse.

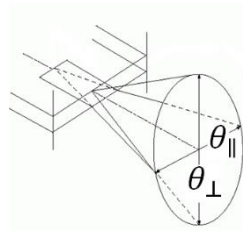


Figura 4. 8: Plano paralelo e perpendicular de um díodo laser

O efeito da emissão em forma de elipse, pode ser corrigido com o acréscimo de um par de "prismas anamórficos", os quais têm como função expandir o feixe de menor divergência de modo a construir um feixe perfeitamente circular [28], os pormenores da montagem destes prismas, podem ser vistos no Anexo B.

Um factor condicionante para o tamanho da lente de emissão, é o facto da geometria da munição (Capítulo 2) ser bem definida. Para o presente estudo, foi definido como diâmetro para a essa lente, o valor de 5mm.

4.1.1.4- Intensidade de radiação

Após definida a sua risca de funcionamento e o diâmetro de abertura para a lente de emissão, é necessário verificar a intensidade espectral de emissão do laser, em comparação com o ruído provocado pelo meio ambiente (radiação emitida pelo sol e pelo fogo), para verificar se o ruído existente não ofusca por completo o laser.

Como definido anteriormente, a melhor solução encontrada, será a utilização de um dos *lasers* da OSRAM, os quais estão definidos para uma potência de emissão de 25W (SPL LL90) e para 70W (SPL LL90_3), pelo que, deve ser verificada qual a intensidade espectral de cada um, para assim escolher o laser a utilizar.

Ambos os *lasers* têm as seguintes características: largura espectral de $\Delta\lambda = 7\text{nm}$, comprimento de onda de $\lambda=905\times10^{-9}\text{m}$ e um diâmetro de abertura de $d_{ab}=5\text{mm}$. Para calcular a intensidade de radiação emitida pelo laser, é utilizada a seguinte expressão:

$$I = \frac{P_{Laser}}{\pi r^2} \quad (4.4)$$

na qual r corresponde ao raio da lente de emissão.

A intensidade espectral do laser é obtida através da seguinte expressão;

$$I(\lambda) = \frac{I}{\Delta\lambda} \quad (4.5)$$

A tabela 4.5 representa os valores obtidos para a intensidade de radiação e a intensidade espectral emitida pelos *lasers* em análise.

Tabela 4. 5: Intensidade de radiação e intensidade espectral do laser

Potência (W)	Raio do Laser (mm)	Intensidade (W.m ⁻²)	Intensidade espectral (W.m ⁻³)
25	2,5	1,27E+06	1,81E+14
75	2,5	3,82E+06	5,45E+14

Para analisar a intensidade de radiação de um incêndio florestal, este será caracterizado pela incandescência à temperatura equivalente de 500-600°C, e assim se mantém até ser apagado. Um incêndio florestal dá-se num espaço aberto, pelo que, não há um sobreaquecimento provocado por um efeito de estufa, nem há extinção de oxigénio, o que faria apagar o incêndio.

Admitindo que a distribuição espectral da radiação emitida pelo incêndio é modulada pela teoria do corpo negro, a intensidade de radiação pode ser calculada pela *Lei de Stéfan-Boltzmann*:

$$I = \sigma T^4 \quad (4.6)$$

na qual, T é a temperatura em (*Kelvin*) e $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ é a constante de *Stéfan-Boltzmann*.

A intensidade espectral é obtida pela equação de *Planck* e depende fundamentalmente do comprimento de onda que está a ser utilizado e da temperatura que o corpo emite.

$$I(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) \right]^{-1} \quad (4.7)$$

na qual, h corresponde à constante de *Planck* $h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ Joule.s}$ e k à constante de *Boltzmann* $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ Joule.K}^{-1}$.

Através das expressões enunciadas anteriormente, obtém-se os valores para a intensidade espectral medida no fogo para quando há incandescência, os quais são representados na tabela 4.6.

Tabela 4. 6: Intensidade espectral para o fogo, no comprimento de onda de 905nm

Temperatura (K)	Intensidade espectral (905nm) W.m ⁻³
773,15	7,20E+05
873,15	7,60E+06

Para além do fogo, há outro factor que pode ter interferência nas medições efectuadas pelo laser, é ele, o efeito por parte do Sol. A emissão da luminosidade solar está modelada pela teoria do corpo negro, pelo que, sabendo que a temperatura na superfície do sol, é de 5000 K, podemos calcular a intensidade espectral que o Sol emite á sua superfície através da equação de *Planck* para o comprimento de onda em que o laser está a emitir.

Tabela 4. 7: Intensidade espectral para o Sol, no comprimento de onda de 905nm

Temperatura (K)	Intensidade (905nm) W.m ⁻³
5000	2,56E+13

Através da comparação entre as tabelas 4.5, 4.6 e 4.7, é possível verificar que a intensidade espectral emitida pelo laser é superior à intensidade espectral medida no fogo e no sol. Independentemente da potência do emissor ser 25W ou 75W, a intensidade espectral do laser, é uma ordem de grandeza superior à do sol.

4.1.2- Receptor

A figura 4.8 representa os componentes constituintes do bloco de recepção do sinal. Este bloco é constituído por uma óptica de recepção, um filtro passa-banda, um foto-díodo, um amplificador e pelo contador.

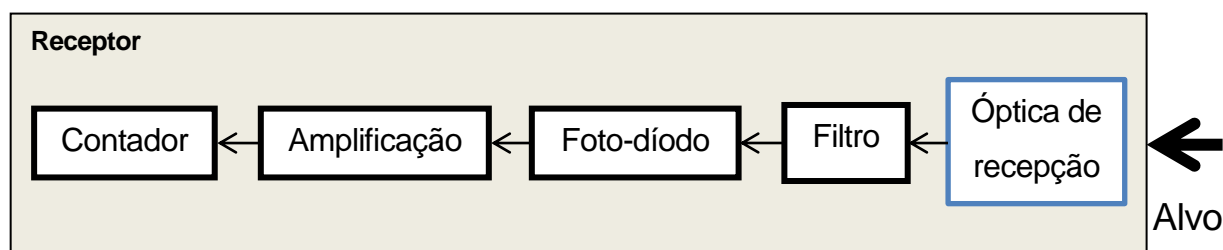


Figura 4. 9: Diagrama de blocos do receptor

Para a parte da recepção, é necessário verificar a relação de dependência entre o emissor e o receptor, caracterizado por: $\frac{P_R}{P_{Laser}}$, tendo em consideração que para o pior caso, a atenuação será de 115,19dB.

4.1.2.1-Óptica de recepção

O uso de lentes na parte da detecção da reflexão do impulso é de extrema importância, pois permite aumentar a área de detecção da radiação reflectida pelo alvo, na direcção do sistema de altimetria.

Para a óptica de recepção é preferível que esta tenha a maior área possível, para assim captar uma parte significativa da energia reflectida pelo alvo. Um dos factores condicionantes para o tamanho da lente, está relacionado com a forma geométrica da munição, a qual é descrita no capítulo 2 e não deve ser alterada.

A óptica de recepção tem como função focar toda a radiação na área de detecção do foto-díodo.

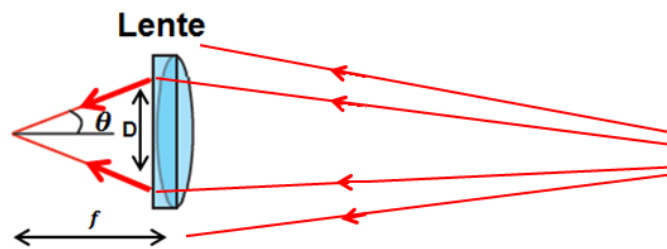


Figura 4. 10: Cálculo da abertura numérica

Tal como descrito na óptica de emissão, a obtenção da distância focal (f), bem como a abertura numérica (NA), são obtidas exactamente da mesma forma, ou seja, através das expressões 4.2 e 4.3.

4.1.2.2-Filtro

Praticamente todos os foto-díodos existentes no mercado têm uma grande gama de valores de comprimento de onda de detecção. Esse comprimento está relacionado com os materiais utilizados na construção do foto-díodo. (Anexo C).

A diminuição da influência do ruído electromagnético no sistema de recepção pode ser conseguida utilizando um filtro que deixe passar sem atenuação a frequência de emissão do laser e atenuie as restantes frequências. Deste modo é possível diminuir a influência da radiação devida ao sol e ao fogo na resposta do foto-receptor.



Figura 4. 11:Incêndio florestal

Para este projecto definiu-se que a melhor solução, será a aquisição de um foto-díodo com filtro incorporado, o qual deve ter o seu máximo da curva espectral de detecção coincidente com a frequência central de emissão do laser.

4.1.2.3-Foto-díodo

A parte da detecção do feixe óptico vindo do alvo, pode ser executada por díodos PIN ou por APDs (avalanche photo diode). O APD tem a vantagem de um alto SNR (Signal to noise ratio), mas precisa de uma tensão de alimentação muito elevada, superior a 300V. Para os díodos PIN a tensão de alimentação pode ser inferior a 40V mas são menos sensíveis, quando comparados com os APDs, o que faz com que

estes precisem de uma amplificação eléctrica. Ambos funcionam bem para detecção de luz, mas para os sistemas que não têm limitações quanto às suas dimensões e à sua fonte de alimentação de energia, é preferível utilizar os APDs para determinação de longas distâncias. No sistema em estudo há a limitação quanto ao espaço, nomeadamente quanto ao espaço para colocação da fonte de alimentação, pelo que, é preferível utilizar um diodo PIN com amplificação para a detecção das distâncias.

Para a escolha do foto-díodo, é necessário observar os valores obtidos através da simulação quando o solo é um difusor perfeito. É necessário que a potência detectada pelo foto-díodo seja suficiente para o excitar e assim provocar um determinado valor de corrente.

As tabelas 4.8 e 4.9, representa a potência recebida pelo foto-receptor, para quando este começa a emitir (80% do tempo de voo total) e para a potência recebida a 20m de altura, quando o sistema emissor é constituído por um emissor SPL L90 e SPL L90_3, respectivamente.

Tabela 4. 8: Potência recebida do emissor SPL L90

Ângulo de lançamento da munição (graus)	Potência recebida no foto-receptor para 80% do tempo de voo (nW)	Potência recebida no foto-receptor a 20m altura (nW)
30	0,31	123,1
45	0,19	221,4
60	0,14	275,9

Tabela 4. 9: Potência recebida do emissor SPL L90_3

Ângulo de lançamento da munição (graus)	Potência recebida no foto-receptor para 80% do tempo de voo (nW)	Potência recebida no foto-receptor a 20m altura (nW)
30	0,92	369,4
45	0,57	664,2
60	0,43	827,6

Com a utilização do foto-díodo SARF500 [29], o qual já contempla um filtro, apresenta as características de resposta ilustradas na figura 4.12.

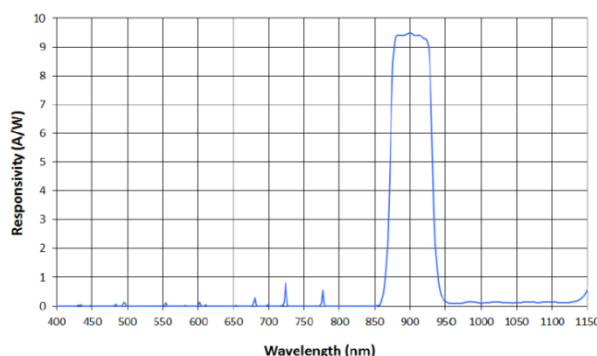


Figura 4. 12: Resposta do foto-díodo SARF500

Uma das características do foto-díodo escolhido, é o facto da corrente no escuro ser de 1nA e o seu ganho ser muito próximo de 10A.W^{-1} , pelo que, com uma potência recebida, no pior caso, para o emissor SPL L90 (25W), a sua detecção seria muito próxima ao mínimo de detecção de corrente no escuro do foto-díodo, pelo que, é preferível optar pelo emissor de maior potência, ou seja, SPL L90_3 (70W).

4.1.2.3-Amplificador

Após o foto-díodo ser iluminado pela reflexão vinda da direcção do alvo, este vai produzir uma corrente proporcional a essa iluminação. A corrente produzida pelo foto-díodo, deve ser amplificada de forma a ser suficiente para parar a contagem.

Para a amplificação dessa corrente, pode-se utilizar um amplificador produzido pela Texas Instruments, o qual tem como referência OPA_380. Este amplificador é ideal para este tipo de sistemas e tem a característica de ser construído também para aplicações militares, sendo assim, mais resistente do que qualquer amplificador comum.

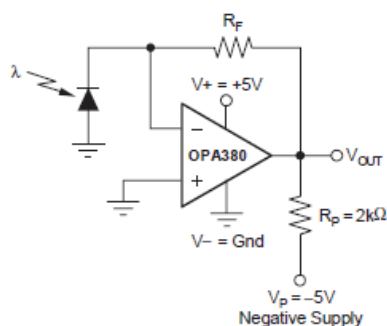


Figura 4. 13: Amplificador OPA_380

A resistência R_p tem como função levar a saída do amplificador a 0V.

4.1.2.2-Determinação do tempo de voo de um impulso

A determinação de um dado intervalo de tempo, pode ser realizado com a utilização de um conversor que representa um dado tempo com uma palavra digital, (Time-to-digital converter). Para estes circuitos, basta

apenas aplicar um sinal de entrada quando o impulso for emitido para iniciar a contagem. Para parar a contagem, é necessário que o impulso reflectido pelo alvo seja suficiente para activar o foto-díodo. O conversor mais simples é um contador de impulsos.

A determinação do tempo de voo de um impulso vai assim, ser realizada com um contador síncrono com um sinal de relógio com uma frequência bem definida. Através do número de períodos que ocorrem no relógio, entre a emissão do impulso e a sua chegada ao sistema de recepção, consegue-se determinar o tempo de voo do impulso.

Para se iniciar a contagem do tempo de voo de um impulso, há a necessidade de se emitir um sinal para o contador. Este deve ser accionado apenas quando o laser estiver a emitir e não logo à saída do modulador, pois com um impulso vindo directamente do modulador, há acréscimo de um erro. Esse erro é devido ao tempo necessário do laser para começar a emitir radiação.

O díodo laser escolhido para o projecto de um sistema de altimetria é o SPL L90_3 da OSRAM, o qual não incorpora foto-díodo, obrigando à utilização de dois prismas, cada um, com um desvio de 45°, para iluminar um segundo foto-díodo, o qua inicia a contagem, como demonstra a figura 4.14

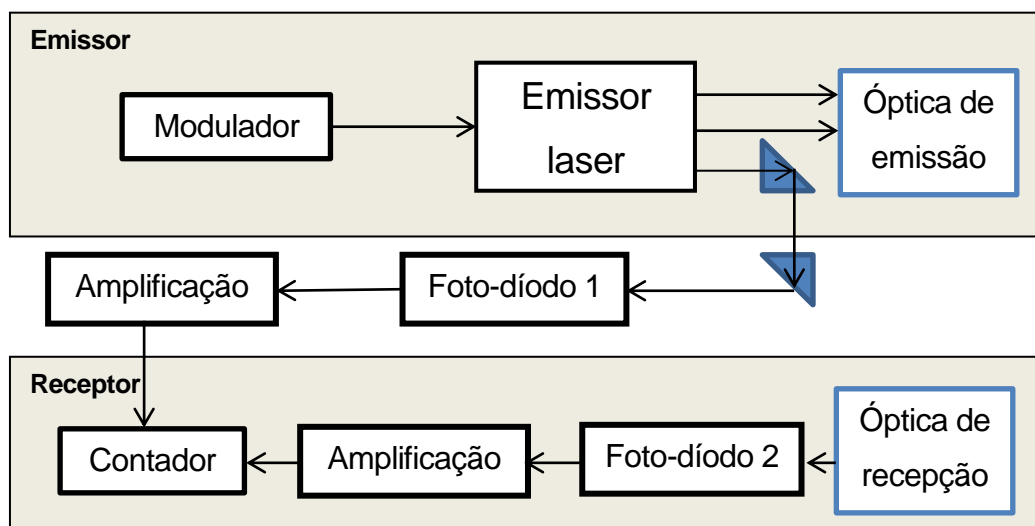


Figura 4. 14: Activação do contador

A activação do contador é efectuada pelo foto-díodo 1, o qual é iluminado pela reflexão da radiação nos prismas. Quando a radiação incidente no foto-díodo 2 for suficiente, o contador pára a contagem, figura 4.15.

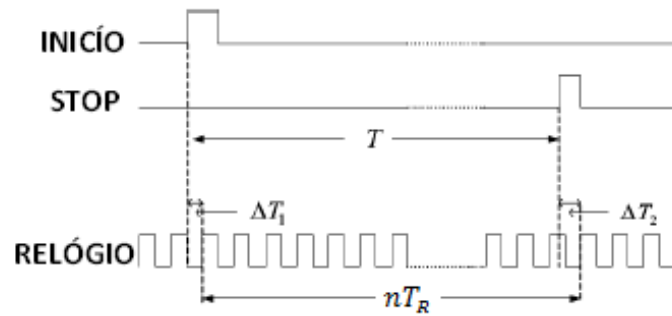


Figura 4. 15: Contador do tempo de voo

Para o cálculo da distância, utilizando este método, utiliza-se a seguinte expressão referida em 2.18, na qual t_c corresponde ao tempo decorrido entre a emissão de um impulso e a sua recepção através da reflexão e pode ser determinado por:

$$t_c = nT_R \quad (4.8)$$

na qual n corresponde ao número de períodos completos ocorridos e T_R corresponde à duração de um período do relógio.

O erro existente na medida, definido na expressão 2.19, depende do período de funcionamento do relógio, e é dado por:

$$\Delta t_c = \pm T_R \quad (4.9)$$

O erro existente na medida do tempo de voo limita o erro na medida da altura a $\Delta D_{min} = c\Delta t_c$. Em 4.1.1.1, viu-se que a precisão da medida é $\Delta D_{min} = ct_r$, ou seja, é limitada pelo tempo de subida do impulso laser, t_r , o que para o laser escolhido corresponde a um erro da medida de altura de aproximadamente 3,9m. Na situação em que $T_R > t_r$, é o erro da medida do tempo que impõe o limite na precisão da medida. Na situação em que $T_R < t_r$ a precisão na medida é a limitada pelo tempo de subida, t_r .

Caso seja necessário determinar períodos de tempo muito pequenos, por exemplo, da ordem dos 14ps, já existem soluções no mercado, tais como, o conversor tempo para digital do fabricante ACAM, figura 4.16. O seu funcionamento é baseado numa linha de atraso de Vernier [30].



Figura 4. 16: TDC da ACAM

4.2- Comando

A parte do comando é constituída apenas por um micro controlador, o qual tem as seguintes funções:

- determinar a distância a que a munição se encontra do solo, de cada vez que o sistema efectuar uma medida;
- iniciar a ordem de ejeção da substância química, quando a munição se encontrar a uma altura compreendida entre os 7m e os 20m de altura;
- iniciar um novo processo de medida;

Para a execução de um sistema com as características já especificadas anteriormente, há a necessidade de adquirir um sistema que seja suficientemente rápido na tomada da decisão. Os microcontroladores Delfino® têm como principal característica um alto desempenho e são construídos para aplicações como, radares e sensores inteligentes.

Para a escolha deste microcontrolador, foram tidos em consideração o seu tempo de processamento e a sua capacidade de memória, pelo que a solução adoptada é o microcontrolador TMS320C2834 [31], o qual tem um relógio interno de 300MHz, uma capacidade de memória de 516kB e que pode ser ligado a vários componentes analógicos.



Figura 4. 17: Microcontrolador TMS320C2834

Eventualmente com este microcontrolador, caso se opte pela utilização do laser SPL LL90_3, o qual tem um tempo de subida de 10ns, é possível utilizar um relógio de 100MHz para efectuar a determinação da distância, o que possibilita a utilização deste microcontrolador também como tendo a função de contador.

Capítulo 5

5. Ensaio experimental

Neste capítulo apresentam-se alguns ensaios com material de laboratório e sistemas construídos com o intuito de ganhar alguma sensibilidade ao funcionamento do equipamento e características dos componentes ópticos, *lasers* e foto-receptores.

5.1-Equipamento utilizado

No presente subcapítulo, é efectuada uma descrição de todo o material utilizado para a execução de alguns ensaios, os circuitos impressos, *lasers* a funcionar com um modulador de impulsos, e de um foto-díodo.

5.1.1-Emissor

Para a aquisição do emissor laser, foram tomados em consideração os seguintes aspectos: o custo do emissor laser, a potência de emissão e a possibilidade de operar no visível.

Os *lasers* utilizados nas diferentes montagens foram, um laser vermelho e um laser verde. O laser verde foi obtido através da aquisição de um ponteiro laser de referência JLP-5G, de baixa potência e de emissão contínua [32]. Após a sua aquisição, este foi desmontado, separando-se o modulador do emissor de radiação laser. A óptica de emissão existente no ponteiro foi aproveitada para o estudo.



Figura 5. 1: Ponteiro laser e óptica

5.1.2-Modulador

Para a modulação dos *lasers*, foi adquirido um modulador de funcionamento por impulsos, ic-HK, do fabricante ic-haus [33]. Este modulador é construído para uso em *lasers* de funcionamento por impulsos e tem a vantagem de se poder usar em conjunto com um controlador de energia. O modulador é bastante robusto e de dimensões reduzidas.

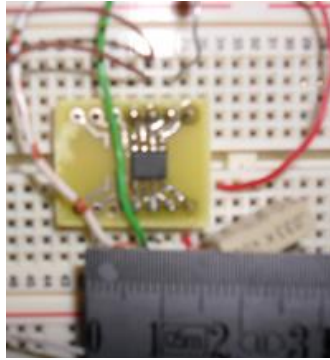


Figura 5. 2: Modulador de impulsos ic-HK

O modulador ic-HK tem um funcionamento muito simples, é basicamente constituído por duas fontes de corrente controladas por tensão.

Para o funcionamento do modulador, é necessário a colocação de um impulso na entrada 1 (EN1) que comanda os interruptores que asseguram a comutação da corrente, e no pin 8 (CI) introduz-se a tensão que controla a fonte de corrente em conjunto com as resistências que se ligam aos pinos 2 e 4, [33]. Nesta aplicação apenas se utiliza uma fonte de corrente, deixando a segunda em aberto. Para uma melhor compreensão do seu funcionamento, consultar o Anexo D.

A figura 5.3 representa os valores possíveis de corrente em função da resistência colocada no pin 4 (AGND1), em função da tensão colocada no pin 8 (CI).

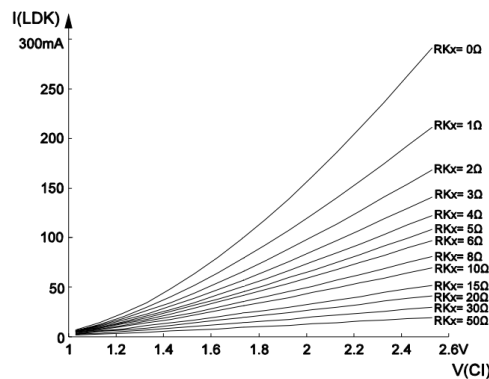


Figura 5. 3: Valor da corrente em função da resistência e da tensão de entrada [33]

5.1.3-Montagem do sistema para emissão de impulsos

Após a escolha dos componentes a utilizar para a emissão de um feixe de radiação laser, foi desenhado e montado um circuito, o qual contém o emissor (1), o modulador ic-HK (2) e um circuito integrado 555 (3). O circuito integrado 555 tem como função, a formação de uma onda quadrada, a qual liga e desliga os interruptores do modulador assegurando a comutação com a frequência desejada para os impulsos laser.

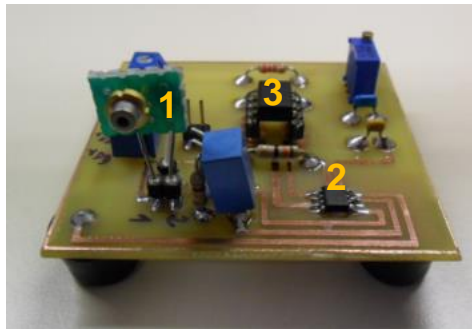


Figura 5. 4: Sistema de emissão

5.1.4- Foto-receptor

Para a detecção dos impulsos emitidos pelo emissor 5.4, montou-se o circuito representado na figura 5.5 o qual utiliza um foto-díodo selectivo (600nm-700nm), o qual tem por referência EPD-660-1-0.9, do fabricante EPIGAP [34]. Este foto-díodo apresenta características tais como, o tempo de subida (t_r) e o tempo de descida (t_f) iguais a 40ns e uma corrente no escuro (dark current) igual a 40pA.

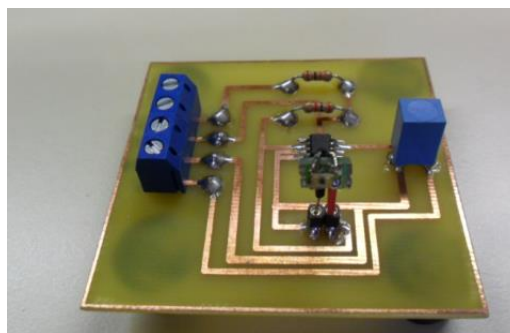


Figura 5. 5: Sistema de recepção

Nos testes efectuados com o laser verde (532nm) o foto-receptor utilizado é o 818-BB-21A, do fabricante Newport [35]. O foto-receptor é constituído por um foto-díodo de silício, e já incorpora amplificação. A figura 5.6.mostra este foto-receptor.

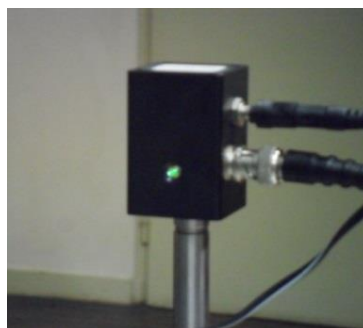


Figura 5. 6: Foto-receptor Newport 818-BB-21A

O facto de se ter utilizado este foto-receptor, obriga a ter em atenção alguns aspectos característicos deste, tais como:

- O foto-receptor apenas tem uma abertura de 0.40mm^2 e não contempla nenhum sistema para adaptação de lentes colimadoras.
- Tem uma largura de banda de recepção compreendida entre os 300 e 1100nm. O ideal seria os valores de um comprimento de onda próximos do comprimento de onda do visível verde (532nm) do emissor.
- Uma das vantagens deste foto-receptor é o facto de ter um tempo de resposta inferior a 500ps sendo portanto adequado à detecção de impulsos luminosos com uma duração de alguns ns.

A figura 5.7, retirada de [35], representa a resposta deste foto-receptor em função do comprimento de onda a detectar.

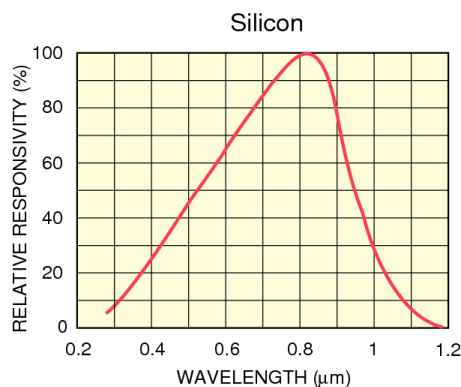


Figura 5. 7: Resposta do foto-receptor em função do comprimento de onda a detectar

O máximo da responsividade deste foto-díodo situa-se entre os 800 e os 850nm, Deste modo se se estiver a trabalhar na região do verde (532nm) a sua responsividade já só é aproximadamente metade da que se verifica no máximo.

5.1.5- Gerador de impulsos

A parte da geração de impulsos para a detecção da modulação suportada pelo laser, é constituída por um gerador de impulsos modelo 50MHz Pulse/Function Generator model 81, da marca WAVETEK.

Este gerador de impulsos tem a característica de se poder alterar o *duty cycle* do período, ou seja, é possível mantendo a frequência dos impulsos, aumentar ou diminuir o tempo durante o qual o laser está a ser excitado por corrente.

A figura 5.8 representa dois impulsos emitidos pelo gerador para uma frequência de 20kHz, em que a duração do impulso é de $18\mu\text{s}$, enquanto o tempo em está sem emitir é de $32\mu\text{s}$.

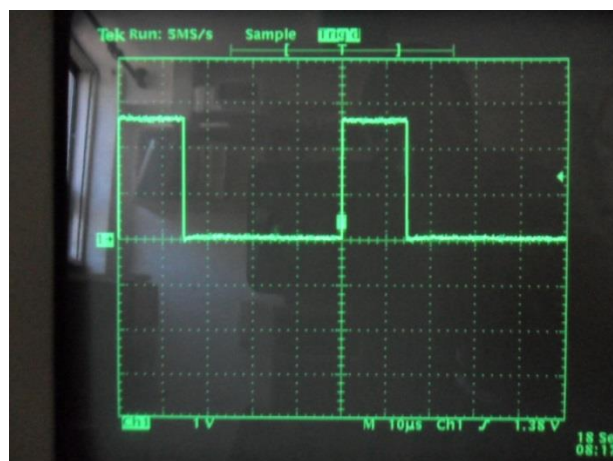


Figura 5. 8: Representação de um impulso com duração de 18 μ s

5.1.6- Fontes de tensão

As tensões necessárias à montagem dos diferentes circuitos foram obtidas a partir de uma fonte de tensão, modelo PS503A DUAL POWER SUPPLY da marca TEKTRONIX, a qual inclui duas fontes independentes variáveis entre -20V e 0 e entre 0 e 20V respectivamente, e uma fonte com uma tensão fixa de 5V.

5.1.7-Determinação da distância

Para a determinação de distâncias, utilizando telemetria por impulsos, há a necessidade de saber a diferença de tempos entre o impulso emitido e o impulso recebido.

Existem diversas formas para apurar o tempo decorrido entre o momento em que o impulso foi emitido e a sua recepção. Neste subcapítulo são descritos dois métodos possíveis para a determinação desse intervalo de tempo. O primeiro consiste na utilização de um osciloscópio, no qual, é possível a utilização dos cursores para esse efeito, enquanto o segundo método consiste na utilização de um frequencímetro, o qual determina automaticamente a diferença de tempos entre os dois sinais recebidos.

5.1.7.1- Obtenção da distância usando um osciloscópio

Através de um osciloscópio é possível determinar o tempo decorrido entre a emissão de um impulso e a sua reflexão, através do correcto posicionamento dos cursores. O primeiro cursor é colocado no início do impulso emitido, pelo gerador de impulsos, enquanto o segundo cursor é colocado no sinal recebido pelo foto-receptor.

5.1.7.2- Medição da distância usando um frequencímetro

Uma outra forma de contagem do tempo de voo do impulso consiste no uso de um frequencímetro, o qual tem como função a contagem da diferença de tempos entre duas frequências. O frequencímetro usado da marca BECKMAN Industrial, avalia a diferença entre duas frequências, através do tempo de descida dos impulsos.

A figura 5.9 demonstra a entrada vinda do gerador de impulsos (1) e a entrada vinda do foto-receptor (2). O frequencímetro está na função TI (Time Interval) e com um tempo de medida de 10s, ou seja, a precisão máxima possível para este frequencímetro.



Figura 5. 9: Frequencímetro UC10A, Beckman

5.2- Determinação da modulação máxima suportada pelo laser

Para iniciar os ensaios, começou-se por verificar qual a frequência máxima de modulação suportada pelo laser, pois este não é construído para a emissão de impulsos, mas sim, para uma emissão de radiação contínua. Para determinar o valor máximo suportado pelo laser, colocou-se inicialmente o foto-receptor na direcção do feixe emitido pelo laser, como demonstrado na figura 5.10.



Figura 5. 10: Foto-receptor colocado na direcção do feixe emitido pelo laser

Após vários testes e alterações da distância entre o emissor e o receptor, conseguiu-se determinar que o laser verde consegue operar com uma frequência máxima de 20kHz e com a largura de emissão do impulso, igual ou superior a 18 μ s.

A figura 5.11 ilustra o impulso emitido pelo gerador no canal 1, com as características enunciadas anteriormente, enquanto o canal 2, ilustra a recepção do impulso, através do foto-receptor.

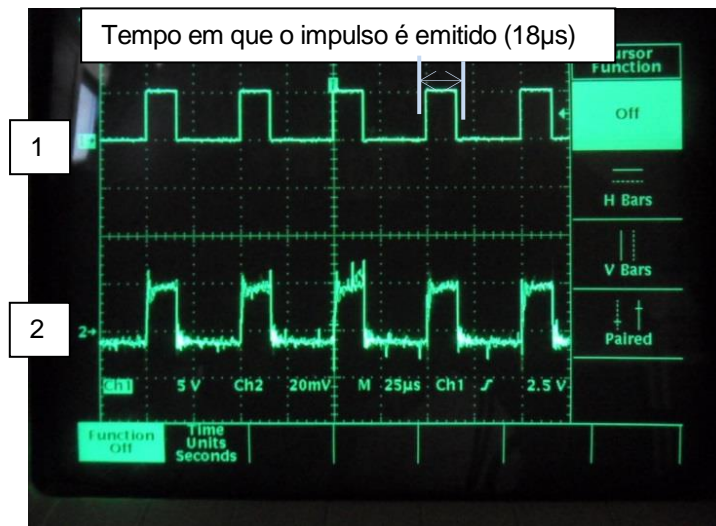
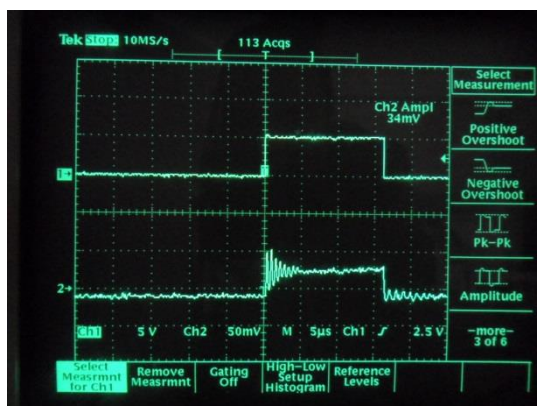
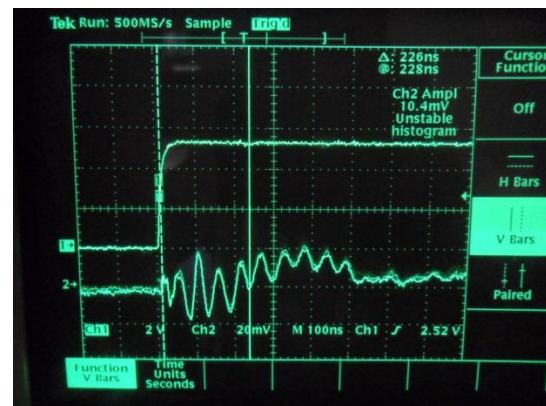


Figura 5. 11: Impulso vindo do gerador (1), impulso recebido no foto-receptor (2)

Na figura 5.12 observa-se o impulso de corrente e o impulso detectado pelo foto-receptor. A observação do impulso no foto-receptor mostra que a duração do transitório no início do impulso tem uma duração da ordem de alguns microssegundos $4\mu s$ figura 5.12 (a), Atendendo ao tempo de resposta do detector a variação observada deve descrever a resposta transitória do laser à comutação de corrente. Na figura 5.12 (b) expandiu-se a escala de tempos e é possível observar que durante $\sim 230ns$ não existe uma iluminação contínua do foto-receptor.



a)



b)

Figura 5. 12: Impulso emitido pelo laser verde

5.3-Resultados obtidos

Após efectuar a determinação da frequência máxima de modulação suportada pelo laser, deu-se início à execução dos primeiros testes práticos. Os testes foram realizados em dois cenários distintos. O primeiro cenário para a realização dos testes, consistia em colocar o foto-receptor na direcção do feixe emitido pelo laser, como ilustrado anteriormente na figura 5.10, enquanto o segundo cenário consiste em colocar o foto-receptor ao lado do emissor, para que a distância seja determinada através da reflexão do impulso vinda do objecto, figura 5.13.

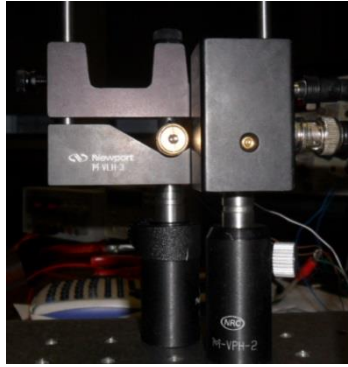


Figura 5. 13: Emissor e receptor

5.3.1- Resultados obtidos para a primeira montagem

Começando por analisar os valores teóricos para a primeira montagem, a expressão para determinar o tempo de voo do impulso entre o emissor e o foto-receptor, pode ser descrito por:

$$t = \frac{D}{c} \quad (5.1)$$

A tabela 5.1 representa quais os valores que se deveria obter para a situação descrita. É de salientar, que estes valores apenas podem ser obtidos na teoria, pois estas equações não têm em consideração possíveis atrasos inerentes aos equipamentos utilizados.

Tabela 5. 1: Tempo teórico com o foto-receptor colocado em frente ao feixe

Distância (m)	Tempo (ns)
0,5	1,668
1,7	5,671

Após a análise do tempo teórico, foram realizados testes com o sistema montado em laboratório. Os testes realizaram-se para as distâncias de 0.50m e 1.7m. Como resulta dos resultados obtidos nos capítulos anteriores, com uma frequência de relógio de 20kHz não é possível discriminar as distâncias indicadas na tabela 5.1. Os resultados seguintes só demonstram portanto essa impossibilidade.

O frequencímetro foi programado para precisão máxima. Para a menor distância (0.5m), a duração do intervalo de tempo entre o impulso emitido e o recebido no foto-receptor oscilava entre um valor mínimo de 0,2543 e o máximo de 0,2578μs, pelo que, a sua média é de 0,2561μs.

Para a distância superior (1,7m) o intervalo de tempo oscilava entre um tempo mínimo de 0,2731 e um máximo de 0,2762us, pelo que, a sua média é de 0.2747μs.

A tabela 5.2 representa a diferença entre o tempo obtido por via teórica e o obtido em laboratório, para assim ser possível determinar qual o erro associado ao sistema, devido aos componentes que o constituem.

Tabela 5. 2: Tempos determinados com o foto-receptor colocado na direcção do feixe

Distância (m)	Tempo teórico (ns)	Média dos tempos (us)
0,5	1,668	0,2561
1,7	5,671	0,2747

Tal como era esperado, com este tipo de telemetria, a medição de distâncias com estas frequências de relógio é impossível devido ao erro observado.

5.3.2- Resultados obtidos para a segunda montagem

Alterou-se o sistema de medida, colocado o foto-receptor ao lado do emissor, proporcionando a medição da distância ao objecto através da reflexão do impulso no objecto.

Os testes executados começaram com a colocação do objecto a 0.5m e após a obtenção dos resultados, o objecto foi deslocado para uma distância de 1.7m, como é possível visualizar nas imagens 5.14.

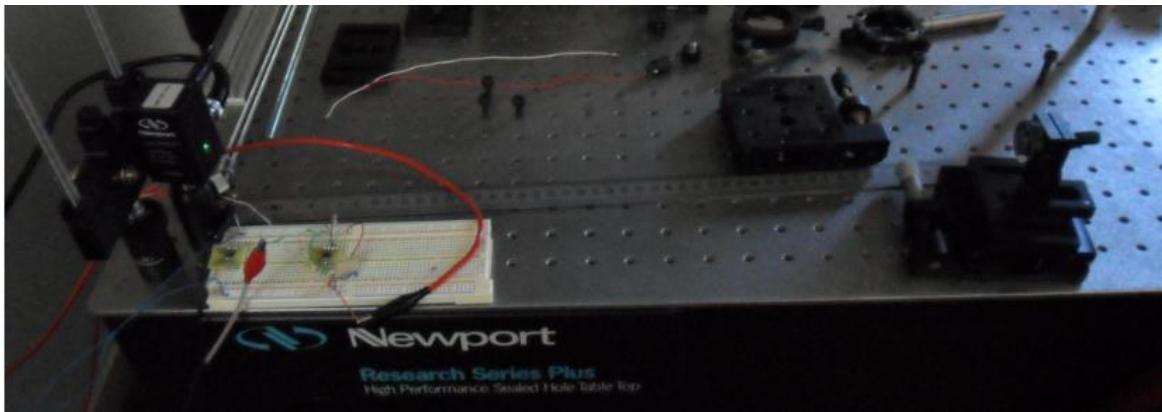


Figura 5. 14: Objecto a detectar, colocado a 0.50m do sistema de medição

Para este caso, a expressão utilizada, tem em consideração o percurso de ida e volta do impulso. Tal como para o cálculo anterior, não é considerado nenhum erro provocado pela parte electrónica ou pelos restantes componentes constituintes do sistema de medição, pelo que, os testes teóricos utilizam a expressão 2.17. Foi construída a seguinte tabela, a qual apresenta os valores ideais para a reflexão num objecto, do tipo, reflector perfeito, para a distância de 0.5m e 1.7m.

Tabela 5. 3: Tempo teórico para um sistema de telemetria com reflexão espelhar

Distância (m)	tempo (ns)
0,5	3,336
1,7	11,341

Tal como no ponto anterior, com uma frequência de relógio de 20kHz não é possível discriminar as distâncias indicadas na tabela 5.1. Os resultados seguintes só demonstram portanto essa impossibilidade.

Com o sistema construído, executaram-se testes para as distâncias referidas na tabela 5.3. O frequencímetro, forneceu uma oscilação de tempos para a menor distância, a variar entre um tempo mínimo de 0,2711us e um tempo máximo de 0,2736us, dos quais resulta um tempo médio de 0,2724μs.

De seguida deslocou-se o objecto para 1,7m do sistema de medição de distâncias, obtendo-se uma oscilação para os tempos de 0,2775us e um tempo máximo de 0,2815us, o que resulta num valor médio de 0,2795μs.

Tabela 5. 4: Tempo determinado com o sistema de teste

Distância (m)	Tempo teórico (ns)	Média dos tempos (μs)
0,5	3,336	0,2724
1,7	11,341	0,2795

Como era de esperar os valores medidos revelam que, tal como no caso anterior, embora haja emissão e recepção de impulsos não é possível determinar valores aceitáveis para a distância.

Capítulo 6

6. Conclusões, Perspectivas de trabalho futuro e contribuições originais

6.1 Conclusões finais

O objectivo da presente Dissertação de Mestrado consistiu no projecto de um sistema de altimetria, capaz de ser aplicado na munição FIREND® 155mm, a implementar futuramente na munição.

Para atingir o objectivo anteriormente referido, inicialmente foi demonstrada qual a importância da utilização desta munição na sociedade civil nomeadamente por permitir complementar os meios de combate a incêndios terrestres e aéreos, possibilitando, por exemplo, que em zonas escarpadas, ou em situações de má visibilidade ou com muito vento, haja um meio “pesado” que apoie os bombeiros na extinção das chamas.

O sistema de altimetria destina-se a ser aplicado na munição. O funcionamento do sistema é portanto condicionado pelo comportamento da munição. A munição condiciona o sistema devido a vários factores como por exemplo, espaço, a trajectória descrita após o lançamento pelo obus, a aceleração a que é submetida no obus. Em relação ao espaço a munição limita o espaço disponível para a montagem do sistema e a área através da qual se emite e recebe a radiação electromagnética. Efectuar medidas com a munição em movimento impõe limites à duração de cada medida, pois o tempo de voo da munição (da ordem dos segundos) é pequeno.

O método de medida proposto no sistema de altimetria é o de telemetria por impulsos. As razões da sua escolha residem na necessidade de medir distâncias da ordem do quilómetro, e das limitações temporais impostas ao processo de medida. Efectuou-se uma descrição do funcionamento da telemetria por impulsos, quando o sistema está colocado na munição. A influência da trajectória no comportamento do sistema foi modelada e simulada no capítulo 2,

Quando o sistema emite radiação electromagnética, esta radiação propaga-se na atmosfera até ser reflectida por um alvo e parte regressar e ser detectada pelo sistema. As condições que afectam a propagação da radiação e a sua reflexão é o ruído electromagnético introduzido pelo ambiente e pelo fogo são descritos e considerados no capítulo 3. Através desse estudo, foi possível determinar a banda de frequências da radiação electromagnética mais adequada às condições de funcionamento do sistema e as restrições impostas ao emissor e ao receptor devido à atenuação do sinal na atmosfera. Por outro lado, determinaram-se limites ao tempo mínimo de uma medida de altura. Os resultados obtidos, em conjunto com os do capítulo 2, permitem no capítulo 4 o dimensionamento dos principais componentes do sistema de emissão e de recepção da radiação laser.

A parte experimental efectuada permitiu a familiarização com o funcionamento de equipamento laboratorial e em especial com as principais características dos componentes ópticos do sistema que se pretende construir. As limitações de tempo não permitiram a realização de um protótipo como inicialmente pensado.

6.2- Trabalhos futuros

Um tema que merece consideração e que não foi abordado neste trabalho consiste no estudo da influência da aceleração inicial sofrida pelo obus no circuito de medida. No projecto FIREND[®], pretende-se usar um obus 155mm e como forma de lançamento para a munição a carga 1 (ver tabela 6.1). Há razões para admitir que o sistema pode funcionar correctamente, contudo, com outras cargas em que a munição é sujeita a maiores acelerações já a situação pode ser mais complicada.

Para uma melhor percepção da aceleração inicial sofrida pela munição, é apresentada a dedução para o cálculo da aceleração inicial sofrida pela munição, consoante as cargas utilizadas para o lançamento desta.

O comprimento do cano do obus é conhecido, tem um comprimento de 3.565m, pelo que, é possível determinar o tempo que a munição demora a percorrer todo o cano através da seguinte expressão:

$$t = \frac{3.565}{v_{0carga}} \quad (6.1)$$

A aceleração à qual a munição está sujeita é:

$$a = \frac{\Delta v}{t} \quad (6.2)$$

Sabendo que a aceleração da gravidade g tem um valor aproximado de 9.8m/s^2 consegue-se obter a quantos “g’s” a munição está sujeita, através da expressão:

$$Força_g = \frac{a}{9.8} \quad (6.3)$$

A tabela 6.1 representa todas as cargas existentes para o possível lançamento da munição de 155mm, as suas velocidades à saída do cano e a determinação da aceleração inicial sofrida pela munição para as diferentes cargas. O seu efeito no sistema deve ser objectivo de futuros trabalhos.

Tabela 6. 1: Força gravítica sofrida pela munição

Comprimento do cano (m)	Carga	Velocidade inicial (m/s)	Tempo (ms)	Aceleração (m.s ⁻²)	Força Gravítica (G's)
3,565	1G	207,3	17,20	12054,2	1230,0
	2G	234,7	15,19	15451,4	1576,7
	3G	268,2	13,29	20177,1	2058,9
	4G	310,9	11,47	27113,3	2766,7
	5G	371,9	9,59	38796,5	3958,8
	3W	274,3	13,0	21105,3	2153,6
	4W	316,4	11,3	28081,1	2865,4
	5W	374,6	9,5	39361,9	4016,5
	6W	463,3	7,7	60209,5	6143,8
	7W	563,9	6,3	89195,9	9101,6

Um outro tema pode ser a exploração da influência do movimento de rotação da munição no comportamento do sistema, figura 6.1, explorando a possibilidade de utilizar vários detectores de radiação.

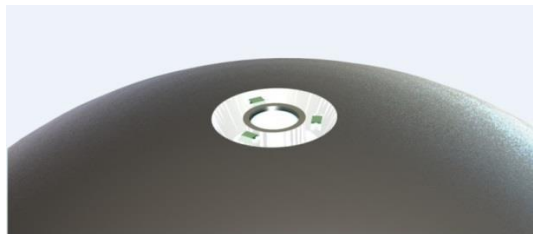


Figura 6. 1: Utilização de 3 foto-receptores para superar o efeito de rotação

O desenvolvimento de outros sistemas baseados no mesmo princípio de medida pode também ser efectuado. Por exemplo o desenvolvimento de um sistema de escuta através da detecção das vibrações associadas às frequências da voz com um laser, figura 6.2 ou o estudo e construção de um sistema para aplicação no projecto de navegação autónoma do robot JAGUAR, figura 6.3, para que este ao detectar um obstáculo a uma determinada distância modifique a sua trajectória, evitando a colisão.

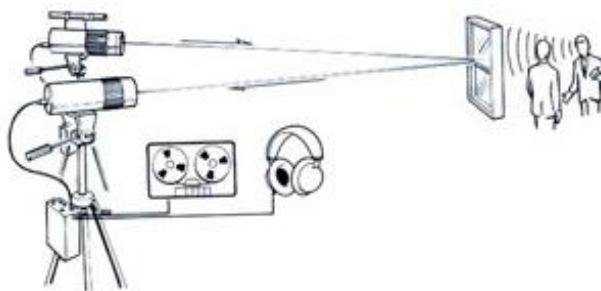


Figura 6. 2: Uso de um laser como sistema de audição de longo alcance



Figura 6. 3: Robot JAGUAR 4x4- Wheel

Bibliografia

- [1] ANPC, GNR e ICNF, “Relatório Anual de Áreas Ardidas e Incêndios Florestais em Portugal Continental,” 2012.
- [2] Exército Português, [Online]. Available: <http://www.exercito.pt/sites/CFT/Actividades/Paginas/4363.aspx>. [Acedido em 20 Junho 2013].
- [3] G.N.R, “Guarda Nacional Republicana,” [Online]. Available: http://www.gnr.pt/default.asp?do=TVcf/tv25_vzntrz_yv0x. [Acedido em 20 Junho 2013].
- [4] “portal do ambiente e do cidadão,” maiambiente, [Online]. Available: <http://ambiente.maiadigital.pt/ambiente/floresta-1/mais-informacao-1/sobre-as-florestas-em-portugal/>. [Acedido em 20 Junho 2013].
- [5] V. Andrade, “Incêndios custam mil milhões por ano,” 2012.
- [6] Soares, Incêndios Florestais - Controlo do fogo, Curitiba: FUPEF, 1985.
- [7] F. Lima, *Desenvolvimento de Munições de Artilharia para Combate a Incêndios Florestais*, Instituto Superior Técnico, 2005.
- [8] E. Dias e L. Quintero, *Desenvolvimento de Um Projectil de Accionamento Mecânico*, Instituto Superior Técnico, 2006.
- [9] J. Balula, *Fabrico para Ensaio de Conceito Melhorado de um Projectil de Detonação Mecânica para o Combate a Incêndios Florestais*, Instituto Superior Técnico, 2008.
- [10] C. Castanheira, *Fabrico e ensaio balístico em condições reais de conceito melhorado de um projétil de detonação mecânica*, Instituto Superior Técnico, 2012.
- [11] J. Calado, *Projecto de um projétil de calibre 155mm para combate a incêndios*, 2013.
- [12] E. P. Baltsavias, Airborne laser scanning: basic relations and formulas, ETH-Hoenggerberg, CH-8093 Zurich, Switzerland: Institute of Geodesy and Photogrammetry, 1999.
- [13] J. C. Villanueva, “Universe Today,” 19 Julho 2009. [Online]. Available: <http://www.universetoday.com/34795/acceleration-due-to-gravity/>. [Acedido em 9 Abril 2013].
- [14] C. T. Odom, “A DRAG COEFFICIENT BASED ON THE 155MM SHELL, HE,” Setembro 1958.

- [15] NASA, "Terminal velocity (gravity and drag)," NASA, 13 Maio 2013. [Online]. Available: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/termv.html>.
- [16] Manual de Munições de Artilharia de campanha, Academia Militar.
- [17] "e-escola," Instituto Superior Técnico, 25 Agosto 2004. [Online]. Available: <http://www.e-escola.pt/topico.asp?id=34>. [Acedido em 19 Março 2013].
- [18] "Lambert's cosine law," [Online]. Available: http://www.princeton.edu/~achaney/tmve/wiki100k/docs/Lambert_s_cosine_law.html. [Acedido em 13 Julho 2013].
- [19] M. S. Assis, Introdução à Propagação das ondas Radioelétricas, Campina Grande, Brasil: Comitê Brasileiro da URSI, 2012.
- [20] F. T. Ulaby, Electromagnetics for Engineers, Bookman, 2005.
- [21] N. I. a. M. Agency, "Glossary os Marine Navigation".
- [22] HY-LINE, "Operating the Pulsed Laser Diode SPL LLxx," OSRAM, Alemanha, 3 Novembro, 2004 .
- [23] intersil, High Speed, Single Channel, Power MOSFET Driver, intersil, 2006.
- [24] E. E. e S. M. P., "The Beer's law applied to the earth's atmosphere," *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 23, 3, Setembro, 2001.
- [25] C. Y. C. John C. Curlander, Emerging Telecommunications Technologies, Wiley Online Library, 1991.
- [26] P. R. L. Junior, "Projecto Óptico de Espoleta de Proximidade a Laser Para Bombas de Fins Gerais e Altimetro Laser de Curto Alcance," Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil, 2006.
- [27] I. I. Kim, B. McArthur e E. Korevaar, Comparison of laser beam propagation at 785nm and 1550nm in fog and haze for optical wireless communications, Optical Access Incorporated 10343 Roselle Street, San Diego, CA, 6 Fevereiro 2001.
- [28] O. Svelto, Principles of Lasers, Piazza Leonardo da Vinci, 32 20133 Milano, Italia: Springer, 1998.
- [29] L. COMPONENTS, Silicon Avalanche Photodiode, SARF-Series, Laser Componentes, USA, 2012.
- [30] G. S. Jovanovic e M. K. Stojcev, Vernier's Delay Line Time-to-Digital Converter, University of Novi Pazar, 2009.

- [31] T. Instruments, "TMS320C28346 Delfino Microcontrollers," Texas Instruments, Texas Instruments 655303, Dallas, Texas, 2009.
- [32] R. L. Technik, Roithner Laser, [Online]. Available: <http://www.roithner-laser.com/datasheets/laserpointer/jlp-5g.pdf>. [Acedido em 10 Maio 2013].
- [33] "iC-Haus," iC-Haus, [Online]. Available: http://www.ichaus.de/upload/pdf/Hk_f1es.pdf. [Acedido em 12 Julho 2013].
- [34] O. EPIGAP, "SMD-Photodiode EPD-660-1-0.9," EPIGAP Optoelektronik, D-12555 Berlin, Kopenicker Str.325b, Haus 201, 2007.
- [35] "Newport, model: 818-BB-21A," Newport, [Online]. Available: http://search.newport.com/?q=*x2=sku&q2=818-BB-21A. [Acedido em 16 Julho 2013].
- [36] R. FARCY, Applications des lasers, 120, bd Saint-Germain, Paris: MASSON, 1993.
- [37] A. M. Morgado, "Utilização segura de lasers," 2012.

Anexos

Anexo A- Classificação dos *lasers*

“A classificação dos *lasers* nas classes 1, 2, 3a, 3b e 4 seguida na versão de 1993 da norma IEC825-1, foi alterada para a norma IEC60825-1. Actualmente a classificação em vigor é a indicada na seguinte tabela. A designação M refere-se a condições de observação através de óptica com ampliação. A designação R refere-se a “reduced requirements” e resulta da possibilidade de reduzir os requisitos da antiga classificação 3B numa zona de transição” [37]. Passam assim a existir as seguintes classes, por ordem crescente de perigosidade para o ser humano; 1, 1M, 2, 2M, 3R, 3B e 4.

Classificação	Comentário
Classe 1	Seguros em condições normais de utilização
Classe 1M	Seguros em condições normais de utilização desde que não observados através de qualquer tipo de óptica com ampliação
Classe 2	Não causam danos permanentes ao olho em condições de utilização razoavelmente previsíveis desde que qualquer exposição possa ser terminada pelo reflexo de piscar o olho (resposta de aversão. assume-se que ocorra após 0.25 s). Devido a assumir o este reflexo só podem ser classificados como classe 2 lasers com emissão na região do visível.
Classe 2M	Podem causar danos permanentes se observados através de qualquer tipo de óptica com ampliação
Classe 3R	Lasers que emitem na gama de comprimentos de onda de 302.5 nm a 1 mm. Danos potenciais para observação intra-feixe as com riscos inferiores aos colocados pelos lasers classe 3B. Emissões limitadas a 5 vezes a emissão de lasers classe 2 para a gama de 400nm a 700 nm e a 5 vezes a emissão de lasers classe 1 para a restante gama
Classe 3B	Lasers inseguros para exposição ocular em qualquer comprimento de onda. Para exposições curtas, não provocam danos na pele. Exigem apenas protecção ocular. Exposições a reflexões difusas são seguras para tempos de exposição inferiores a 10 s
Classe 4	Estes lasers podem queimar a pele, provocar incêndios e, quando focados, ionizar a atmosfera

Anexo B- Colimação de um feixe laser

A seguinte figura representa um par de prismas anamórficos idênticos quanto à forma, tamanho e ângulo de desvio α . A superfície do primeiro prisma, onde incide o feixe de diâmetro AB, tem como função o alargamento do diâmetro do feixe, o qual à saída do prisma tem uma largura de feixe CD. O segundo prisma, tem como função, aumentar ainda mais a largura do feixe, bem como, colocar o feixe no plano paralelo (MN), ao inicialmente emitido pela fonte luminosa (AB).

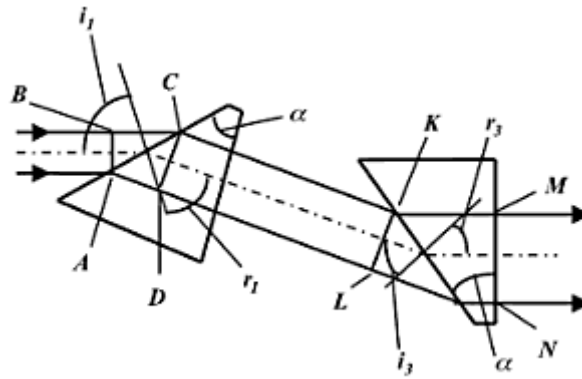


Figura : Par de prismas anamórficos idênticos [38]

O par de prismas apresentado, está relacionado pela razão entre o feixe à saída do segundo prisma (MN) e o feixe à entrada do primeiro prisma (AB), ou seja,

$$R = \frac{MN}{AB} \quad (1)$$

O que pode ser expresso pela seguinte relação:

$$R = \frac{MN}{AB} = \frac{MN}{KL} \frac{KL}{AB} = \frac{\cos r_1 \cos r_3}{\cos i_1 \cos i_3} = \left(\frac{\cos r_1}{\cos i_1} \right)^2 = R_1^2 \quad (2)$$

é tomado em consideração que, $r_1 = \alpha$, pelo que obtemos a seguinte expressão para a abertura de saída do laser, do segundo prisma:

$$R_1 = \sqrt{R} = \frac{\cos \alpha}{\cos i_1} \quad (3)$$

onde i_1 é definido pela lei de Snell da refração [38], i.e., $\sin i_1 = n \sin \alpha$.

Anexo C- Material constituinte dos foto-díodos

Os materiais mais utilizados para a construção dos foto-díodos são:

- silício (Si): necessidade de baixa corrente para detecção da luz, detecção rápida, boa sensibilidade entre 400 e 1000nm.
- Germânio (Ge): necessidade de uma alta corrente para detecção, a sua resposta é lenta, boa sensibilidade entre 900 e 1600nm.
- fosforeto de arseniato de gálio e índio (InGaAsP): bastante caro, baixa corrente, resposta rápida, 1000 e 1350nm;
- arseniato de índio e gálio (InGaAs): caro, baixa corrente, resposta rápida, boa sensibilidade entre 900 e 1700nm

Anexo D-Modulador ic-HK

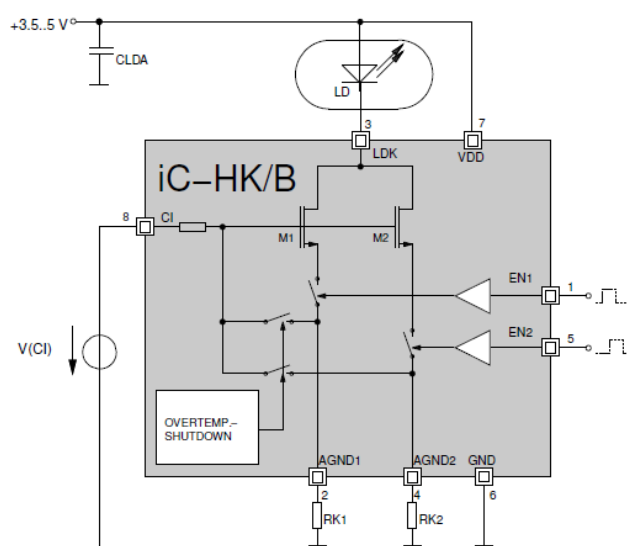


Figura 1: Modulador ic-HK

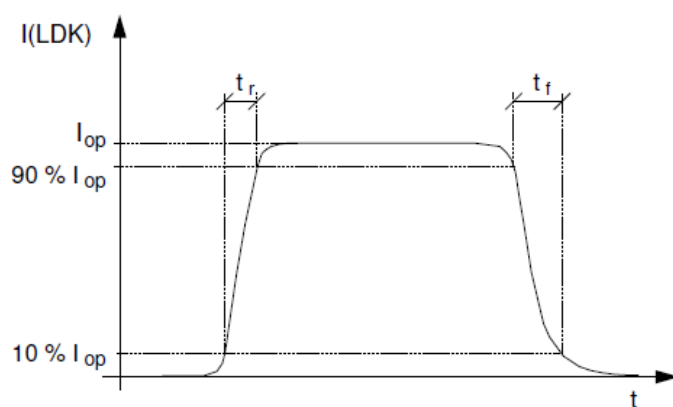


Figura 2: Característica do impulso emitido pelo ic-HK

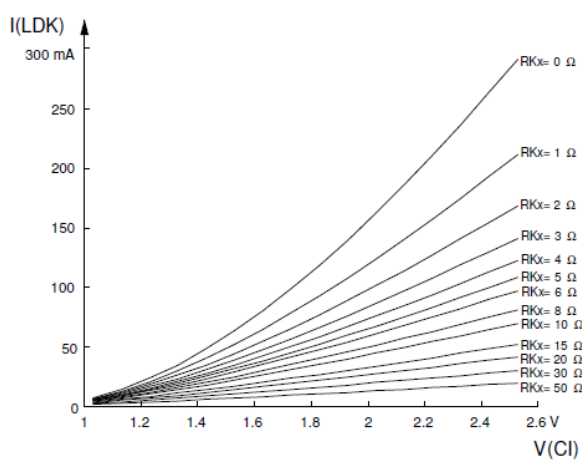


Figura 3: Corrente fornecida ao emissor, em função da resistência e tensão escolhidos